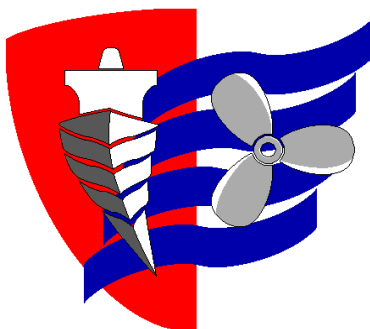


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Planeador submarino (AUV GLIDER),
diseño y construcción.**

**Underwater GLIDER (AUV), design and
construction.**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: David Espinosa García

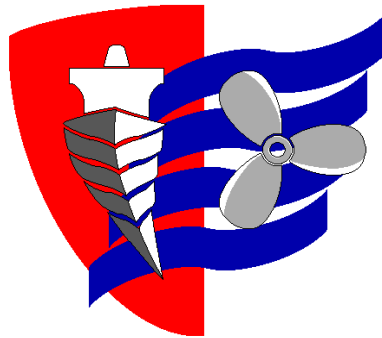
Director: Alfredo Girón Portilla

Codirector: Jesús María Villar González

Septiembre – 2020

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Planeador submarino (AUV GLIDER),
diseño y construcción.**

**Underwater GLIDER (AUV), design and
construction.**

Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARÍTIMA

INDICE

INDICE	3
Índice de Ilustraciones	6
Resumen y motivación.....	11
1. Ámbito y alcance de este TFG.	12
2. Diseño conceptual.....	14
2.1 Antecedentes.....	14
2.2 Requisitos del producto deseado.....	16
2.3 Un resumen visual sobre nuestra búsqueda.....	24
2.4 Sobre los límites operativos.....	26
2.5 Dimensionamiento del AUV.....	27
3. Proyecto contractual.....	30
3.1 Memoria.....	30
3.1.1 Especificaciones.....	30
3.1.2 Disposición general.....	31
3.2 Descripción de las partes y sus funciones.....	33
3.3 Algunos ejemplos de piezas desarrolladas y construidas.....	39
3.3.1 Las alas del GLIDER.....	39
3.3.2 Algunas fotos del concepto, del diseño CAD, y de la realización material	41
3.3.3 Sobre la relación de aspecto del perfil de ala.....	46
3.3.4 Algunos números sobre el perfil NACA 0020:	50
3.3.5 Detalles en CAD de las piezas de plástico PLA	51
3.3.6 Carenado - Forro de las alas.....	56
3.3.7 Atado de las alas al cuerpo de AUV.....	59
4. Proyecto constructivo.....	60
4.1 Definición y descripción.....	60
4.2 Algunos ejemplos de piezas desarrolladas y construidas.....	61
4.2.1 Ojivas de proa y popa.....	61
4.2.2 Tapas estancas de proa y popa.....	63

4.2.2.1	Tapa de proa.....	63
4.2.2.2	Tapa de popa.....	66
4.2.3	Cámara de flotabilidad y embolo de empuje.	67
4.2.4	Sistema de propulsión, motor y engranajes.	68
4.2.5	Alas del GLIDER.	70
4.2.6	Imágenes de pruebas de estanqueidad.	71
4.2.7	Módulo de cambio de asiento y escora.	73
4.2.8	Vista de disposición general de submarino GLIDER.....	74
4.3	Planos de las piezas del submarino.....	75
5.	Bibliografía.....	92
5.1	Referencias de Libros.	92
5.2	Otras referencias de la web, red Internet.....	92
6.	ANEXOS.	95
6.1	Como se ha configurado este TFG.....	95
6.1.1	Sobre la 'espiral del proyecto' y la memoria.	95
6.1.2	Componentes considerados en la síntesis proyectiva.....	97
6.2	Facetas específicas de la ingeniería marítima analizadas en este TFG.	98
6.2.1	Estanqueidad.	99
6.2.2	La resistencia estructural.	115
6.2.3	Flotabilidad, estabilidad, propulsión y gobierno.....	128
6.2.4	Disposición de los mecanismos	137
6.3	Mecanismo modular de cambio de escora y asiento	140
6.3.1	Cálculos de pesos y posiciones	142
6.3.2	Diferencia entre los objetos según que intercepten la superficie libre del fluido (flotantes) o no.	142
6.4	Mecanismo de variación de trimado y escora.....	147
6.4.1	Sobre el control de la trayectoria.....	147
6.4.2	Propulsión	148
6.4.3	Modelo de sustentación hidrodinámico	149
6.4.4	Configuración del plano vélico, planos sustentadores.....	153
6.4.5	Gobierno	171
6.5	Control y electrónica	173

6.5.1	Electrónica, electromecánica y control	173
6.6	Estimación económica	178
6.6.1	Efecto de la escala en el coste.....	179
6.6.2	Tiempo de impresión en una impresora 3D según el tamaño de la boquilla del cabezal de impresión	180
6.6.3	Sobre el potencial de comercialización	182
Conclusión.		185

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Normativa ISO 10013 esquema.....	13
Ilustración 2 Submarino de investigación 1 SeaGLIDER	24
Ilustración 3 Submarino de investigación 2 SeaGLIDER	24
Ilustración 4 Submarino de investigación 3 Spray	24
Ilustración 5 Submarino de investigación 5 Slocum.....	25
Ilustración 6 Modulo de inundación de la tapa de proa. Fuente Propia.	34
Ilustración 7 Sistema de escora Br, Er, Pr y Pp. Fuente Propia.....	35
Ilustración 8 Alas de planeo para el submarino. Fuente Propia.	36
Ilustración 9 Esquema de disposición inicial. Fuente Propia.....	38
Ilustración 10 Dibujo a mano alzada sobre sistema de alas. Fuente Propia.	41
Ilustración 11 Colocación de varillas y soportes de alas. Fuente Propia.	42
Ilustración 12 Ampliación Ilustración 11. Fuente Propia.	42
Ilustración 13 Plano del diseños de soportes de alas. Fuente Propia.....	43
Ilustración 14 Sobre impresión de soportes de alas. Fuente Propia.	43
Ilustración 15 Perspectiva 1 Colocación real de los soportes de alas. Fuente Propia.....	44
Ilustración 16 Perspectiva 2 de la colocación de los soportes de alas. Fuente Propia.....	45
Ilustración 17 Perspectiva 3 de colocación de soporte de alas. Fuente Propia.	46
Ilustración 18 Reynolds number calculation 1. Rynolds number.....	48
Ilustración 19 Reynolds number calculation 2.....	49
Ilustración 20 Reynolds number calculation 3. Rynolds number.	49
Ilustración 21 Perfil NACA 0020 Rynols number.....	50
Ilustración 22 Soporte adaptación entre ala y cilindro 1. Fuente Propia.	51
Ilustración 23 Soporte adaptación entre ala y cilindro 2. Fuente Propia.	51
Ilustración 24 Soporte adaptación entre ala y cilindro 3. Fuente Propia.	52
Ilustración 25 Soporte adaptación entre ala y cilindro 4. Fuente Propia.	52
Ilustración 26 Soporte adaptación entre ala y cilindro 5. Fuente Propia.	53
Ilustración 27 Soporte adaptación entre ala y cilindro 6. Fuente Propia.	53
Ilustración 28 Plano soporte adaptación entre alas y cilindro. Fuente Propia.	

.....	54
Ilustración 29 Solo perfil de adaptación entre alas y cilindro. Fuente Propia.	54
.....	54
Ilustración 30 Vista frontal entre pieza adaptación alas y cilindro. Fuente Propia.....	55
Ilustración 31 Plano de medidas pieza de adaptación. Fuente Propia.....	56
Ilustración 32 Foto perfil de alas montadas 1. Fuente Propia.	57
Ilustración 33 Foto perfil de alas montadas 2. Fuente Propia.	58
Ilustración 34 Sujeción de alas con las gomas elásticas. Fuente Propia.	59
Ilustración 35 Ojiva de popa con tapa estanca.	61
Ilustración 36 Ojiva de proa con tapa estanca. Fuente Propia.....	62
Ilustración 37 Impresión de la tapa de proa en la maquina 1. Fuente Propia.	63
.....	63
Ilustración 38 Impresión de la tapa de proa en la maquina 2. Fuente Propia.	64
.....	64
Ilustración 39 Tapa de proa modelo 1. Fuente Propia.	64
Ilustración 40 Tapa de proa modelo 2. Fuente Propia.	65
Ilustración 41 Tapa de proa modelo 3 montada. Fuente Propia.	65
Ilustración 42 Tapa proa se puede ver que las juntas hacen un sello o marcan una huella en el metacrilato deseada. Fuente Propia.	66
Ilustración 43 Tapa popa con ojiva. Fuente Propia.	66
Ilustración 44 Embolo de empuje de la cámara de flotabilidad. Fuente Propia.	67
.....	67
Ilustración 45 Embolo puesto insertado en la cámara de flotabilidad. Fuente Propia.....	67
Ilustración 46 Sistema de engranajes para inmersión. Fuente Propia.	68
Ilustración 47 Motor y Sistema de engranaje montado. Fuente Propia.....	68
Ilustración 48 Motor y sistema de engranaje montado en la tapa de proa. Fuente Propia.	69
Ilustración 49 Mismas alas del planeador que la figura 35. Fuente Propia.	70
Ilustración 50 Prueba de estanqueidad. Fuente Propia.	71
Ilustración 51 Prueba de estanqueidad continuación. Fuente Propia.	72
Ilustración 52 Modulo de virada y inclinacion del submarino final. Fuente Propia.....	73

Ilustración 53 Primer módulo diseñado virtualmente de virada e inclinación del submarino. Fuente Propia.....	73
Ilustración 54 Vista general de disposición del submarino. Fuente Propia. .	74
Ilustración 55 Soporte motor inundación 1 Fuente Propia.	76
Ilustración 56 Modulo de virada 1 Fuente Propia.....	77
Ilustración 57 Soporte motor inundación 2 Fuente Propia.	78
Ilustración 58 Soporte motor inundación 3 Engranajes Fuente Propia.	79
Ilustración 59 Tapa de popa Fuente Propia.	80
Ilustración 60 Tapa de popa modificada sensor presión .Fuente Propia.	81
Ilustración 61 Tapa de popa modelo descartado 1 Fuente Propia.....	82
Ilustración 62 Tapa de popa modelo descartado 2 Fuente Propia.....	83
Ilustración 63 Tapa de proa Fuente Propia.	84
Ilustración 64 Tapa de proa modelo descartado Fuente Propia.....	85
Ilustración 65 Tapa de proa modelo final Fuente Propia.....	86
Ilustración 66 Columpio para batería Fuente Propia.....	87
Ilustración 67 Soporte servo desplazamiento Fuente Propia.....	88
Ilustración 68 Soporte servo longitudinal para inmersión Fuente Propia.	89
Ilustración 69 Soporte para carro de virada móvil Fuente Propia.	90
Ilustración 70 Soporte servo virada Fuente Propia.	91
Ilustración 71 Tapas comerciales para estanqueidad. Fuente Propia.....	99
Ilustración 72 Tapa proa con cilindro de inundación. Fuente Propia.....	102
Ilustración 73 Plano de Cajera para hacer simetría circular. Fuente Propia.	104
Ilustración 74 Junta tórica Fuente Propia.....	105
Ilustración 75 Tapa proa. Fuente Propia.	106
Ilustración 76 Tapa Proa 1.1. Fuente Propia.....	108
Ilustración 77 Conformado de tapa de proa y cámara de inundació Fuente Propia.....	109
Ilustración 78 Conformado virtual de tapa de popa. Fuente Propia.	109
Ilustración 79 Pre-visualización de forma del submarino. Fuente Propia....	110
Ilustración 80 Usillo para unión de junta tóricas. Fuente Propia.	111
Ilustración 81 Visualización de usillo para la unión de juntas tóricas. Fuente Propia.....	112
Ilustración 82 Programa de cálculo de juntas. Oring gland calculator.....	114

Ilustración 83 Colapso de cilindros por vacío 1. Felipe Artucio.	117
Ilustración 84 Colapso de cilindros por vacío 2. Wabash National.....	117
Ilustración 85 Colapso de cilindros por vacío 3. Wabash National.....	118
Ilustración 86 Evolución de tensión 1. Collapse animation.	119
Ilustración 87 Evolución de tensión 2 Collapse animation.	119
Ilustración 88 Sistema alternativo de variación de la flotabilidad. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.....	130
Ilustración 89 Embolo de inundación1 Fuente propia.	135
Ilustración 90 Embolo de inundación 2 Fuente propia.	135
Ilustración 91 Sistema de inundación 1 Fuente propia.	138
Ilustración 92 Servo motor estándar usado. Futaba.	139
Ilustración 93 Sistema de inundación 2 Fuente propia.	140
Ilustración 94 Imagen módulo de virada y balance de pesos Fuente propia.	141
Ilustración 95 Plano de crujía del GLIDER. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.	149
Ilustración 96 Curva CI v Alpha.....	150
Ilustración 97 Formula 1.....	150
Ilustración 98 Formula 2.....	150
Ilustración 99 Formula 3.....	151
Ilustración 100 Comparison of wing geometry and wing loading	153
Ilustración 101 Formula 4.....	154
Ilustración 102 Comparison of tail volumen and coefficients.....	155
Ilustración 103 Illustration of wing.....	155
Ilustración 104 Plano velico	156
Ilustración 105 Formula 5.....	158
Ilustración 106 Geometría.....	159
Ilustración 107 Formula 6.....	160
Ilustración 108 Formula 7.....	161
Ilustración 109 Formula 8.....	161
Ilustración 110 Formula 9.....	161
Ilustración 111 Formula 10.....	162
Ilustración 112 Referencia pagina 144 de VB Tof.....	162
Ilustración 113 Forma de ala y parámetros. VB Tof.....	163

Ilustración 114 Formula 11. VB Tof.....	164
Ilustración 115 Re Formula 12. VB Tof	165
Ilustración 116 Glider mass definitions. VB Tof.....	166
Ilustración 117 Formula 13. VB Tof.....	167
Ilustración 118 Formula 14.....	168
Ilustración 119 Equilibrium flider using lift drag.	168
Ilustración 120 Equilibrium speed usin lift, drag, estimated from referenc data.	169
Ilustración 121 Formula 15.....	169
Ilustración 122 Grafica Depth rate and Forward speed.....	170
Ilustración 123 Sipider plot.....	170
Ilustración 124 Estudio Glider. Geogebra clásico.	172

Resumen y motivación.

A partir de alguna información que nos llegó, surgió la curiosidad por este tipo de AUV, (Autonomous Underwater Vehicle), el GLIDER, o planeador submarino. Su simplicidad conceptual y su reducido consumo energético para la propulsión lo señalaban como un producto atractivo para ser estudiado o conocido.

Se trata de un Vehículo capaz de modificar su flotabilidad, y con ello crear una fuerza de hundimiento o flotabilidad, que dé lugar a un movimiento controlable. En principio ese movimiento sería solo en dirección vertical, subiendo o bajando en la masa del fluido, como un ascensor.

Pero si aplicamos conocimientos derivados de la teoría de sustentación de alas de perfil aerodinámico, y le dotamos de alas, podemos convertir nuestro vehículo en un planeador, el cual es capaz de moverse también con una componente de velocidad horizontal mientras sube o baja.

Y si, además de lo anterior, controlamos (por medio de actuadores mecánicos) la posición de la línea de acción de la fuerza de flotabilidad podremos hacer que sea capaz de girar a uno u otro lado, a la vez que avanza y sube o baja. Además de tentarnos la curiosidad de estudiar la viabilidad de un vehículo de este tipo, se presentaba como reto la posibilidad de construirlo. No era una idea descabellada, ya que el número de partes es relativamente pequeño, y su geometría puede ser sencilla.

Incorporando una fase de construcción en este TFG añadíamos un gran valor a lo que suele ser un trabajo básicamente académico. Al cruzar todo el espectro del diseño: conceptual, preliminar, de detalle y constructivo, realimentábamos toda la cadena de proyecto bajo el paradigma ‘diseño para la construcción’, que es un buen fundamento.

Todo lo anterior saciaba nuestra ‘necesidad de hacer’, y por ello constituía un conveniente objeto de deseo. Ambicioso pero atractivo.

1. Ámbito y alcance de este TFG.

Se pretende enfocar ese trabajo (TFG) desde un punto de vista afín a la titulación de Grado en Ingeniería Marítima, por lo que hemos pretendido atender con interés algunas facetas del proyecto que consideramos muy específicas de esta formación académica. Sin embargo, no hemos querido dar una estructura documental clásica del tipo PROYECTO DE INGENIERÍA, sino que nos hemos decantado por otra, más libre o flexible, del tipo ESTUDIO TÉCNICO, también contemplada como posible dentro del reglamento de los TFG de esta escuela.

El alcance de este **estudio** recorre desde el proyecto conceptual, hasta la realización material de la nave. Aunque hemos recorrido las 3 etapas: diseño conceptual – proyecto contractual y construcción, no vamos a volver en la documentación presente para el TFG un proyecto “forma” completo, ya que eso nos obligaría a detallar demasiado algunos aspectos y no es lo que hemos pretendido.

Con la forma de ESTUDIO TECNICO, pretendemos tener mas flexibilidad en la forma y también en el fondo de lo que deseamos describir, que no es otra cosa que un recorrido sobre GLIDER, desde la intención de conocerlo hasta el productor real.

La forma en que se ha organizado la documentación de este trabajo ha sido inspirada en la norma ISO 10013, aunque esa está orientada a la documentación de sistemas de calidad.

La intención de esa estructura es mantener una descripción básica (memoria) relativamente ligera y fácil de leer, y desplazar a los anexos todos los detalles y estudios complementarios que podrían distraernos de la exposición del hilo conductor principal.

La siguiente figura es una descripción gráfica del concepto de estructura documental usado en este trabajo.

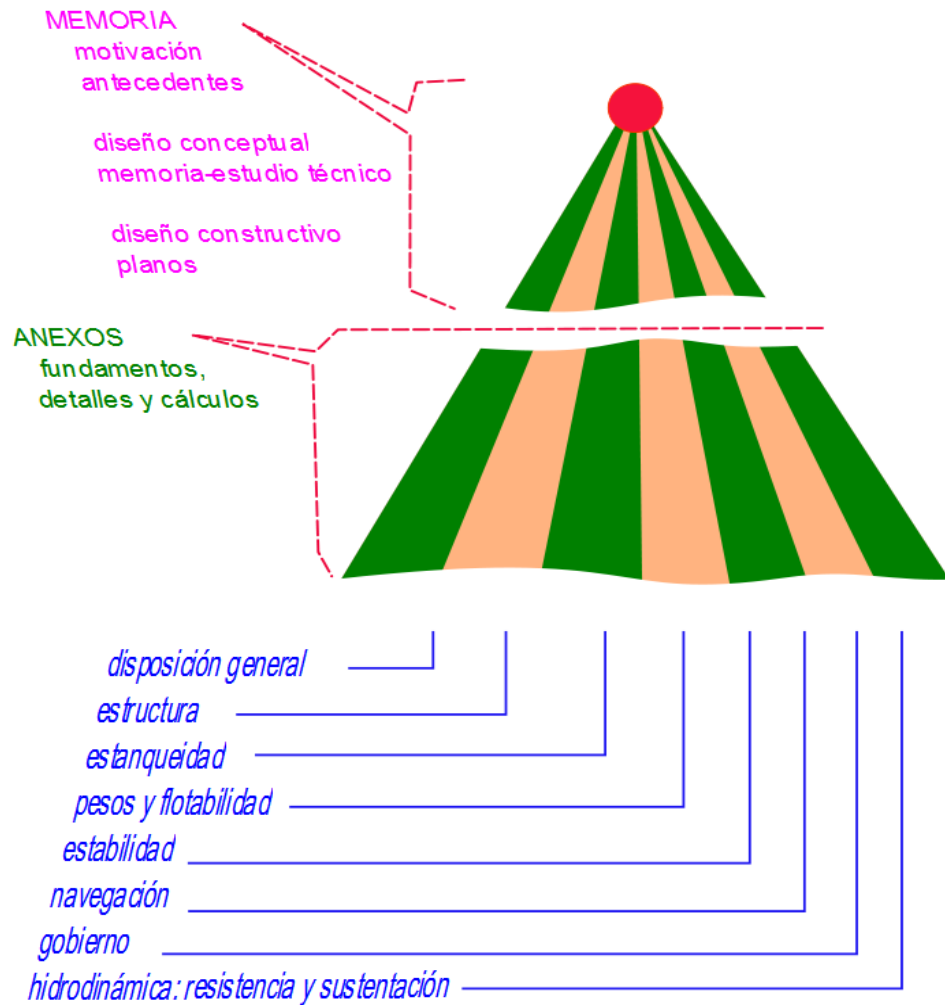


Ilustración 1. Normativa ISO 10013 esquema.

En nuestro caso hemos establecido un primer nivel de información, que llamamos **Memoria**, dividida en **capítulos** donde se tratan las siguientes materias de forma comprensible, descriptiva sin entrar en demasiados detalles.

- Antecedentes
- Diseño conceptual
- Proyecto contractual
- Especificaciones y memoria
- Planos del proyecto constructivo
- Construcción de las partes y montaje

En un segundo nivel, en los llamados **Anexos**, se ha profundizado en las explicaciones y detalles de cada uno de los capítulos de la Memoria.

2. Diseño conceptual.

2.1 Antecedentes.

Tras iniciar la investigación en la Web sobre este tipo de vehículos (AUV), se hace visible que existe una gran cantidad de productos en este sector. Si orientamos nuestra búsqueda con un conjunto de términos o palabra clave, como:

AUV.

OPEN DESIGN.

Educational mecatronics.

3dPrint.

Comprobamos que existen muchas entradas. Algunas muestras de productos son las siguientes:

3 drones submarinos a nuestro alcance, por un precio moderado.

<https://www.youtube.com/watch?v=e6eMc4UYEHg>

KIT de montaje de un dron submarino.

https://www.youtube.com/watch?time_continue=110&v=r-zq_R3wKII

Los 5 mejores drones submarinos.

<https://www.youtube.com/watch?v=DRoTNVgO6XU>

El escaparate de la tienda de AUV para llevar.

<https://www.sofaroccean.com/products/trident>

Nueva panorámica del estado del arte en 2019.

<https://www.livescience.com/61431-underwater-drones.html>

Parece que alrededor de estas ideas hay muchas posibilidades de negocio, comercio y ocio. Y también actividad investigadora y técnica, afín a la ingeniería y sistemas navales.

Todavía queremos afinar más en nuestra búsqueda, incluyendo el término UNMANNED UNDERWATER GLIDER, o planeador submarino no tripulado. Mostramos algunos de los enlaces más relevantes.

Una entrada en Wikipedia, imprescindible

https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_GLIDER

y en español la correspondiente, con menos extensión.

https://es.wikipedia.org/wiki/GLIDER_Submarino

otros enlaces de modelos consolidados comercialmente

<http://www.teledynemarine.com/autonomous-underwater-GLIDER>

<https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-seaGLIDER/>

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-GLIDER.html>

Revisar la Web dos años después de haber iniciado nuestro TFG nos deja en evidencia. Al comienzo del trabajo, en su día, habíamos localizados algunas referencias útiles, pero ahora hay muchas más. El crecimiento de la información alrededor de este tema es algo muy vivo. Dos años en la Web es mucho tiempo. Y en la vida también. Pero esa faceta revisionista es la cualidad cíclico-iterativa de la actividad del proyectista, tal como se dice en la teoría del diseño-proyecto.

2.2 Requisitos del producto deseado.

Nuestra lista de deseos es la siguiente:

1. El producto ha de ser **tecnológicamente accesible** para nosotros, para que podamos construirlo con elementos que se encuentren en el mercado 'normal' on line (ebay, Aliexpress, amazon, entre otras).
2. Ha de ser un producto **barato**, económicamente accesible para un estudiante con medios modestos, como hobby.
3. Los elementos que debemos adaptar o construir deben estar igualmente al alcance de **nuestros medios de fabricación** modestos.
4. El producto construido debe ser de un **tamaño y peso** que sea fácil de manejar por **una sola** persona.
5. A la vez, debe tener la **robustez** debida para poder manipularse sin riesgo de dañarlo, y sus piezas delicadas estarán **protegidas** en consecuencia.
6. Deberá ser capaz de hacer inmersiones hasta una **profundidad de diseño** 'notable', por ejemplo 25 m. Eso es suficiente para demostrar que llega donde nosotros no podemos.
7. Su **autonomía** ha de ser suficiente para acometer misiones 'completas' a esa cota de inmersión. Por ejemplo, capaz de **10 ciclos (seguidos) completos** de movimiento abajo-arriba, descendiendo hasta la cota de diseño.
8. Debe disponer de una **bodega** con acceso fácil, y capaz para albergar instrumentos de exploración simples, como por ejemplo un teléfono móvil, una mini-cámara de acción que puedan tomar imágenes de las inmersiones. etc.

9. El producto debe ser capaz de **explicarse** por sí mismo al ser exhibido. Debe tener una **función docente** mientras es construido y después.
10. Su **interior** debe ser fácilmente **accesible**, y las piezas deben poder **revisarse** sin tener que desmontar. Si se requiere, el desmontaje deberá ser fácil.
11. Para el diseño se usarán solo **herramientas software** gratuitas, de tipo OPEN SOURCE, y fáciles de obtener y manejar
12. Los materiales de construcción serán:
 - A. Varillas roscadas, tornillos y tuercas de acero inoxidable.
 - B. Piezas construidas en plástico (PLA) con una impresora 3D de aficionado.
 - C. Tubos comerciales de Metacrilato transparente.
 - D. Elementos de electrónica y electromecánica propios de la robótica recreativa para aficionados (hobby)

Hemos estudiado los antecedentes de este tipo de naves, y a partir de ello hemos ido perfilando las características que serían adecuadas para nuestro producto.

A medida que hemos buscado en la bibliografía se ha ido completando un conjunto de informaciones que hacen que nuestro trabajo ‘se reduzca’ a una buena selección de fuentes de las que extraer las ‘*perlas*’ que necesitamos para nuestro objetivo: proyectar, diseñar y construir un prototipo de GLIDER y

valorar su funcionamiento.

No es un copy paste convencional, sino una síntesis estructurada de elementos componentes que nos permite formar un sistema complejo: el objetivo del proyecto. Un trabajo similar a cualquier proceso de diseño clásico de Ingeniería Naval, en el buque o sus partes.

Aparte de estudiar las fuentes documentales utilizadas, ha sido necesario elegir componentes físicos para la fabricación, y en algunos casos diseñarlos y construirlos con técnicas innovadoras, como la impresión 3d.

Los ladrillos constructivos parecen ya existir, y se presentan como manejables, tanto en su adquisición económica como en los conocimientos requeridos para ensamblarlos. Todo parece posible, dependiendo de la creatividad y la ambición.

Si somos técnicos estudiosos, podemos creer que casi todo parece estar al alcance. Al menos para nosotros habitantes del primer mundo en un estado 'libre'. A este nivel cabe reflexionar si la verdadera muralla que parece haberse atravesado es la de las licencias, patentes y toda la serie de obstáculos legales que dificultan la transferencia de conocimiento y capacidades.

Otra motivación para este trabajo es la simple oportunidad de aprender y enseñar lo aprendido, convirtiendo el producto en una herramienta docente, escaparate para ver conceptos de la resistencia de materiales, la hidrodinámica, la estabilidad, el control, etc. En esa línea es tentador hacer visible el interior, los mecanismos, etc. Se nos ocurre que sea una maqueta 'viva' de cuerpo transparente.

De la "Referencia VaCas", hemos de resaltar que es un papel muy maduro, descriptivo y didáctico, con la intención de explicar y enseñar, semejante a un TFG, pero financiado con beca de la NAVY. Aporta muchas ideas y razonamientos, y ha ayudado a completar nuestro TFG. Destacamos las siguientes ideas sacadas de allí.

1. Su sistema de control de escora (o rol, rolo) es similar al nuestro. Nosotros lo habíamos elegido por su simplicidad y flexibilidad en controlar el parámetro BG y brazo adrizante, pero ellos añaden como utilidad la cualidad de poder invertir el signo de BG, y con ello invertir la geometría de todo el GLIDER. Así pueden sacar mucho provecho del mayor rendimiento de las formas asimétricas de foils. Nosotros no hemos querido aspirar a tanto.
2. Su sistema de sellado de estanqueidad de las tapas está pensado como el nuestro (2 tóricas en paralelo), pero ellos añaden un tercer anillo de ajuste mecánico, liberando de esa responsabilidad a las tóricas de estanqueidad. La tercera junta es, en principio, distinta de las otras dos. Podríamos asumir esa modificación, que mejora la funcionalidad, aunque aumenta el número de partes.
3. Su razonamiento sobre la idoneidad de unos sistemas u otros como alternativas de mecanismo de flotabilidad coincide con el nuestro. Ellos valoran el efecto adverso de las corrientes en zonas costeras, y destacan que la velocidad elevada del GLIDER debe ser un requisito de proyecto. Nosotros hemos descartado ese condicionante por principio, para mantener un producto pequeño y de coste reducido (existe correlación entre esas cualidades).
4. Ellos incluyen una masa móvil como principal actuador para el control de trimado (actitud), a la vez que reservan como misión principal de la vejiga natatoria, y exclusiva de ella, la flotabilidad (10% Masa total) muy aumentada respecto a diseños más clásicos (1% masa total). Nosotros pretendíamos mantener ambas funciones (flotabilidad y trimado) con un actuador único sobre el **volumen de la cámara de flotabilidad** (la vejiga natatoria), pero finalmente entendimos que no era posible prescindir de una masa móvil longitudinalmente para ajustar el trimado.
5. En el estudio del dimensionamiento y disposición de los **planos**

sustentadores, ellos aportan datos estadísticos de otros GLIDER, y nosotros vamos a aprovechar esa información. Su desarrollo es muy directo y coincide con nuestros objetivos.

6. En la selección de **materiales** para el exterior, ellos utilizan aluminio, mientras que nosotros usamos materiales plásticos. Ambas soluciones se consideran óptimas según la escala y el ámbito de la misión. Nuestro material, metacrilato (MC), es transparente, y eso lo hace idóneo para un producto con función didáctica, como es el nuestro. Además, su comportamiento ante ambientes corrosivos acuáticos es superior al del aluminio. La facilidad de mecanizado con los medios de que disponemos también nos decanta por el MC, No obstante, el MC tiene en contra su elevado precio que lo hace sólo admisible a escalas pequeñas. En nuestro caso nos lo vamos a permitir.
7. En el apartado de **resistencia estructural**, ellos aportan unas justificaciones basadas en ASME mientras que las nuestras están basadas primariamente en el reglamento del American Bureau of Shipping (ABS) para sumergibles. Ellos renuncian a refuerzos en el tubo cilíndrico, y alcanzan una **profundidad operativa** de unos 110 m. Nosotros obtenemos una profundidad operativa de 30 m, y no podemos renunciar a anillos resistentes adicionales a los extremos, por razones económicas (el espesor del tubo de metacrilato).
8. Entre las **ayudas a la recuperación**, su sistema de flashes de LED para facilitar su localización visual nos ha parecido una medida aprovechable para nuestro caso, ya que aporta utilidad con mínimos cambios. Por el contrario, el sistema de emersión de emergencia de lastre sólido liberable no nos parece un requisito en nuestro caso, aunque reconocemos que es imprescindible en sistemas de mayor responsabilidad.
9. En el apartado de **control, sensores y posicionamiento**, aquel proyecto es novedoso, ambicioso y completo. Es de destacar el posicionamiento por una malla de referencias no estáticas. En nuestro TFG, esta parte tiene un

contenido mínimo, aunque se reconoce un enorme potencial de desarrollo.

10. La descripción gráfica y matemática del sistema de referencia, ejes, usados en el estudio de AUV.

11. La descripción del sistema de flotabilidad basado en bombeo de aceite a una vejiga natatoria exterior (alternativa que nosotros desechamos en su momento)

De consultar la “Referencia y bibliografía [\(11\) OPENSOURCE](#) “ hemos sacado algunas conclusiones:

12. Nuestro proyecto se parece a aquel en: usar un **tubo de metacrilato transparente** (para que se vean los componentes en su interior, su estado, etc.,) y de 4” de diámetro interior, para tener espacio suficiente para meter alguna electrónica normal, de tipo opensource, o incluso un smartphone o una cámara web. Para el prototipo no es una frivolidad usar un material transparente “exótico”. Pese a que su precio sea singularmente más caro que otras alternativas, la transparencia se ha considerado una cualidad esencial para el diagnóstico de problemas en etapas tempranas. Por otro lado, esa transparencia es muy valorada desde el punto de vista de la estética tecno-didáctica.

13. Usaremos un actuador que cambie el volumen o la masa desplazada, por medio de un solo émbolo. En nuestro caso proponemos usar **un solo émbolo grande**, para simplificar la mecánica y el número de partes.

La dificultad primera está en garantizar la estanqueidad del casco, pese al mamparo móvil que supone el émbolo desplazable.

14. Inicialmente nos proponíamos prescindir de un segundo control de **movimiento longitudinal de lastre móvil**. Esa masa móvil existe, en cambio, en algunos de los GLIDERrevisados en la literatura (ver ref (3)). Nuestra intención era que un solo actuador genere a la vez la variación de

flotabilidad y de momento trimante, de modo que cambie la actitud del AUV en el sentido deseable para el movimiento. Más adelante se constatará que si será requerida una masa móvil en sentido longitudinal, pero será para facilitar el ajuste fino inicial del trimado antes de empezar la misión, para lograr distintas modalidades de velocidad y senda de planeo, y también para poder realizar correctamente la maniobra de cambio de actitud.

15. Si se **cambia la flotabilidad en proa**, por ejemplo, reduciéndola, se induce a que la proa baje, además de la tendencia a hundirse del AUV completo. El hecho de que la proa vaya por delante en ese descenso va a generar sustentación en las alas fijas de GLIDER, situadas del centro hacia atrás en el AUV. El resultado de esa sustentación, combinado con la fuerza de la gravedad dará lugar a un movimiento hacia adelante, de planeo, que permite recorrer distancia en horizontal, a la vez que se va descendiendo en la columna de agua. Al final de ese recorrido, cuando la proa adquiera flotabilidad se producirán un movimiento trimante de elevación de la proa, y enseguida el AUV iniciará el ascenso.
16. Los planos **foils irán en la parte de mitad a popa** para facilitar que la proa suba o baje al cambiar su flotabilidad y genere momento trimante que facilite el cambio de actitud de todo el AUV, además de crear la fuerza hacia arriba o abajo para su navegación.

Las imágenes en los videos de referencia muestran la eficacia del sistema.

Para hacer la simulación basta una hoja de cálculo y las ecuaciones, fáciles de poner con principios básicos de equilibrio de fuerzas y momentos que reflejan la situación cuasi estática que tiene el GLIDER durante el planeo.

También el autor de la página de la referencia Opensource hackaday, declara que empezó a modelar en Solid Works, pero que después pasó a otro programa gratuito, Onshape, derivado de gente de solid works, y

orientado hacia trabajo en la web. Nosotros usaremos freeCAD, que es opensource.

2.3 Un resumen visual sobre nuestra búsqueda.



Ilustración 2 Submarino de investigación 1 SeaGLIDER



Ilustración 3 Submarino de investigación 2 SeaGLIDER



Ilustración 4 Submarino de investigación 3 Spray

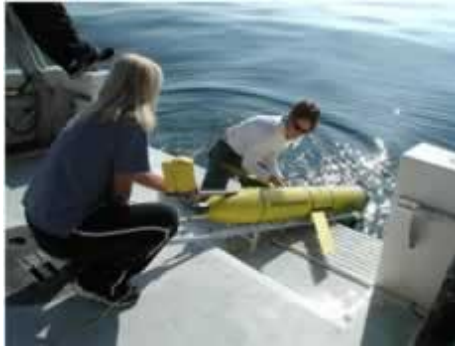


Ilustración 5 Submarino de investigación 5 Slocum

2.4 Sobre los límites operativos.

Conviene enfocar desde el principio cuales son los factores que más condicionan las posibilidades de uso del AUV GLIDER. Son lo que llamamos límites operativos. Nosotros las hemos reducido a dos: autonomía y profundidad límite de inmersión. Los concretamos en el tiempo por la **duración** de su fuente de energía, y en la **profundidad** por la presión hidrostática que puede llegar a inundar el interior, o hacer colapsar la estructura.

Para una tecnología determinada, la cantidad de energía que pueden acumular las baterías es proporcional a su tamaño. Cuanto más grande, más energía. Por otro lado, la estructura del envase que ha de contener todos los elementos del AUV, incluyendo las baterías, y soportar la presión hidrostática de la profundidad, será más exigente y cara cuanto mayor sea la profundidad y la autonomía.

Lo anterior nos lleva a una solución de compromiso que va a condicionar desde el principio ambas cosas, autonomía y profundidad. Cualquier decisión tiene implicaciones de coste, de modo que buscaremos un tamaño que pueda ser asequible a un presupuesto de 'aficionado', de 'estudiante', sin financiación externa. Todo nuestro dimensionamiento estará condicionado por ese aspecto económico.

2.5 Dimensionamiento del AUV.

Debemos estimar las dimensiones del AUV de modo que admita la carga útil que pretendemos incluir en su interior, y pueda operar en el rango de flotabilidad deseable para su movimiento.

La tentación inicial fue construir todo un estudio teórico para alcanzar un modelo numérico a partir del cual tantear dimensiones, etc., intentando obtener las prestaciones predichas por tal modelo numérico.

Pero ese proceso nos cansaría mucho en la fase inicial del proyecto, justo cuando podemos y necesitamos disponer de un gran ánimo y ansia investigadora.

En su lugar, asumimos todo ese conocimiento y experiencias de otros, y pasamos directamente a valorar nuestros principales objetivos:

A) Volumetría:

1. Lo más pequeño posible, para que sea manejable y económico en materiales.
2. Pero no demasiado pequeño. Al menos deberá tener capacidad suficiente para meter la electrónica de control, las baterías, la mecánica de propulsión, y el payload deseable (instrumentos de exploración, etc).

B) Peso:

Creemos que el peso de todos los componentes necesarios es significativamente menor que el volumen desplazado por el AUV, de modo que requeriremos un lastre fijo adicional para conseguir la flotabilidad neutra y el trimado correcto del vehículo en reposo.

C) Volumen de la cámara de flotabilidad variable:

Según los estudios indicados en la bibliografía, es el 1% del volumen total de AUV.

Con esas premisas queda establecido utilizar un cilindro comercial de metacrilato de al menos 100 mm de diámetro. Su longitud no es crítica, pero estimamos un valor conveniente mínimo de 500 a 600 mm. Podemos encontrarlos en ebay.

Puesta en práctica.

Buscando en la web productos comerciales de tipo tubo de metacrilato, se encuentra que la disponibilidad comercial es limitada, y su precio relativamente caro para un usuario particular, aunque asequible para un buen 'aficionado'.

Las medidas encontradas son:

Longitud de 2,05 m, 100x110 mm, 100x96 mm, precios del orden de 40-60 €, el envío es una parte importante (unos 10-20 €).

Atendiendo al corazón debería elegirse el cilindro de 100x110, ya que su espesor es de 5 mm, y es una garantía de durabilidad y posibilita el aumento de prestaciones operativas. Sin embargo, su precio casi duplica el de su inmediato inferior, cuya pared es de 3 mm, con similar diámetro.

Como prueba de concepto, por otro lado, debería bastar el de 3 mm de espesor. No obstante, si consideramos la posibilidad de alguna continuidad en el proyecto habría que acudir a los 5 mm, ya que el valor de los elementos que se ponen en riesgo si se produce un fallo estructural es muy superior. (todo el AUV).

En el balance económico eso tiene un peso moderado, pero la acumulación

de costes. Sin embargo, pesa en el bolsillo.

Hay que matizar que, salvo la electrónica, todos los componentes tipo bastidor, tapas estancas, etc., no serían válidos si se cambia el cilindro resistente de 3 a 5 mm, Ya que sus diámetros son levemente diferentes.

Claramente eso convierte el espesor en una dimensión crítica en este proyecto. Suele decirse que comprar barato es comprar dos veces, salvo que el producto tenga un destino de muestra limitado. Como un particular, inmerso en este TFG (con su carácter de TFG), me quedo con la opción barata, asumiendo que ello repercute del mismo modo en el coste de todos los demás elementos, y que aun así debe dar juego suficiente como prueba de concepto, manteniéndolo dentro de límites operativos de profundidad moderados.

La decisión FINAL para este TFG es mantener el espesor de 3 mm, con todas sus limitaciones y consecuencias. En el corto plazo la inversión barata es la mejor.

3. Proyecto contractual.

Por contractual debemos entender aquí nuestro compromiso para que el AUV pueda ser construido y pueda funcionar realmente. Cada una de las dimensiones o parámetros acordados va a tener repercusión real en el producto final. En ese sentido es un compromiso de viabilidad.

3.1 Memoria.

3.1.1 Especificaciones.

Las características principales resumidas son:

Eslora total	750 mm
Longitud (del cilindro resistente)	600 mm
Envergadura	900 mm
Diámetro exterior	100 mm
Diámetro interior	94 mm
Desplazamiento máximo	4.5 kg
Carga útil (Payload)	0.5 kg (500 g)
Longitud de bodega	200 mm
Volumen de bodega	1000 cm ³
Cota máxima de inmersión	25 m
Velocidad	0.5 m/s
Angulo de planeo	15° (= arcotangente (1/4))
Autonomía	3000 mAh @ 14.4 V (equivale a 50 ciclos de inmersión a 25 m)

3.1.2 Disposición general.

El GLIDER o AUV, se configura como un cuerpo cilíndrico, con forma hidrodinámica, con unas alas situadas en su zona media. Internamente el cilindro es un espacio único (no tiene subdivisiones estancas) que contiene todos los sistemas de la nave. Tales sistemas se han agrupado en módulos De proa a popa, Los elementos visibles exteriores son:

1. Ojiva de proa, con forma hidrodinámica.
2. Cilindro resistente a la presión.
3. Ojiva de popa.
4. En la zona media del cuerpo cilíndrico, se dispone el plano alar, horizontal.
5. En la zona de popa, se dispone el plano vertical de timón anti-deriva.

La configuración interior del cilindro resistente a la presión es la siguiente, descrito de proa hacia popa:

1. Cámara de variación de flotabilidad, integrada con la tapa estanca de proa.
2. Mecanismos del cambio de flotabilidad: émbolo y actuador lineal motorizado (husillo roscado, engranajes, y motor). También incorpora una parte de la electrónica que lo gestiona
3. Mecanismo combinado de cambio de trimado y escora. Incluye como parte del peso móvil una batería.

- a. El peso móvil puede trasladarse transversalmente por medio de un servo motor, de forma que describe una trayectoria en forma de arco de circunferencia.
 - b. Todo el conjunto anterior (bastidor, motor y peso) se configura como un carro que puede moverse longitudinalmente dentro de otro bastidor.
- 4. La siguiente zona hacia popa estará destinada a albergar la electrónica de control, y los elementos sensores que puedan ser concentrados allí.
- 5. Siguiendo hacia popa, habrá un espacio configurado como bodega, cuyo contenido podremos variar con ciertas limitaciones en cuanto a la variación de peso.
- 6. Más hacia popa, el caso resistente termina con la tapa estanca de popa.

3.2 Descripción de las partes y sus funciones.

La disposición general del AUV queda bastante condicionada por su forma de navegar.

Hemos previsto que la fuerza impulsora del GLIDER nace de la variación de flotabilidad de uno de sus extremos. Consideremos que inicialmente el AUV está en equilibrio estático (fuerzas y momentos crean aceleración nula), inmóvil, adrizado y quilla horizontal, y totalmente sumergido.

Si generamos un aumento de peso en un extremo, (por ejemplo, por inundación controlada de un espacio bien delimitado), aparecerá una fuerza hacia abajo, en ese extremo, que también inducirá un momento. El resultado será una aceleración que comenzará a hundir ese extremo. Pero a la vez iniciará el hundimiento de todo el AUV. Ese movimiento se irá acelerando hasta que se equilibre con las fuerzas de resistencia a ese movimiento. Si el AUV dispone de unos planos estabilizadores paralelos al eje longitudinal, y situados en otra sección transversal más próxima al extremo opuesto, al moverse el AUV actuarán como alas fijas y crearán una sustentación y una resistencia hidrodinámicas, que motivarán un descenso como un planeador, siguiendo las leyes de la hidrodinámica.

Si cambiamos la flotabilidad de la proa expulsando agua de lastre, el proceso se producirá en el sentido contrario.

Atendiendo a lo descrito, consideramos que una adecuada forma de disponer longitudinalmente los elementos del AUV es la siguiente.

Empezando por proa la cámara de variación de la flotabilidad es un tubo cilíndrico que atraviesa la tapa estanca de proa. Por el interior de ese tubo discurre longitudinalmente un émbolo con un ajuste estanco con las paredes del tubo. Con ello la cara de proa de dicho émbolo está en comunicación con el agua del exterior, y la cara de popa está en comunicación con el aire del

interior del GLIDER. El émbolo podrá desplazarse de modo controlado cambiando el volumen de la parte del tubo abierta al agua del exterior. Las presiones a ambos lados del émbolo son distintas. Por su cara interior (popa) está sometido a la presión interior, prácticamente constante, pero por la exterior (proa) tendrá una presión mayor, que el mecanismo de accionamiento del émbolo deberá ser capaz de contrarrestar.

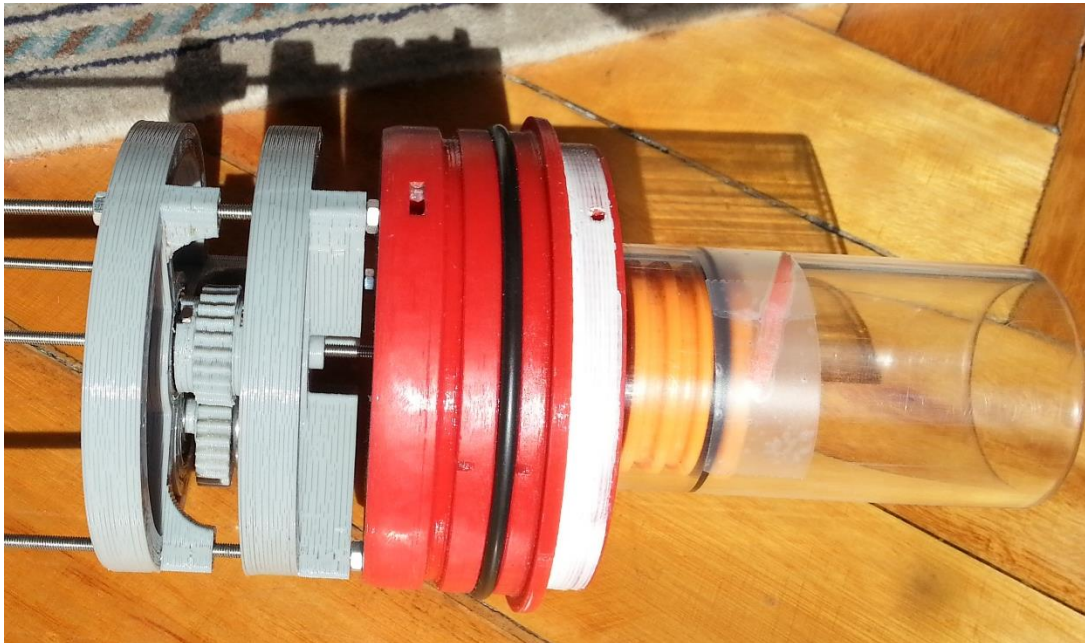


Ilustración 6 Modulo de inundación de la tapa de proa. Fuente Propia.

El siguiente espacio desde la proa contendrá los elementos del mecanismo de acción del émbolo: husillo roscado, engranajes, y motor.

La siguiente zona hacia popa contendrá el mecanismo de cambio de escora, formado por una masa que pende de un eje longitudinal, a modo de péndulo, y puede bascular a una y otra banda, controlando su posición con un servo motor. La masa será la propia batería principal del GLIDER.

Con ello, el CDG (Centro de gravedad) podrá desplazarse fuera de crujía para motivar la escora del AUV. El mecanismo de péndulo de control de escora esta combinado con el de masa móvil longitudinal. Todo el sistema de cambio de escora se mueve como un trineo deslizando a lo largo de las 3 varillas longitudinales que forman parte del bastidor del módulo.

El movimiento longitudinal de ese conjunto también está controlado por un sistema de motor.

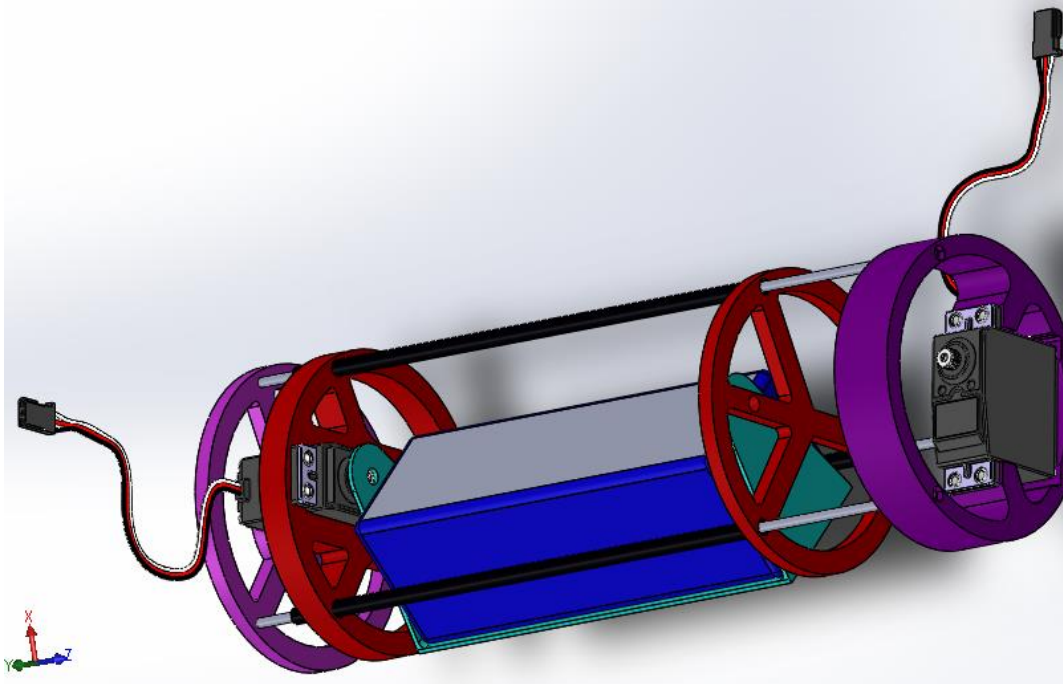


Ilustración 7 Sistema de escora Br, Er, Pr y Pp. Fuente Propia.

La siguiente zona hacia popa estará destinada a albergar la electrónica de control, y los elementos sensores que puedan ser concentrados allí.

Siguiendo hacia popa, habrá un espacio disponible para equipos diversos de observación o medición.

Tal espacio será fácilmente accesible desde la popa, cuando se quite la tapa estanca citada anteriormente, que será el límite por popa de ese espacio, y del propio AUV.

Por la parte exterior, en el tercio posterior, irá dispuesto un anillo de refuerzo postizo, a modo de zuncho, que se abraza al cilindro y además sirve de soporte a los planos estabilizadores en forma de ala. Esos planos laterales podrán ser dos piezas o solo una (la unión de ambos planos en prolongación), y su posición será perpendicular al eje longitudinal del AUV, y coplanario al eje longitudinal del AUV.

Por la simetría arriba/abajo de la operación del GLIDER, los planos tienen doble simetría, tanto respecto a crujía como respecto al plano perpendicular a crujía que pasa por el eje longitudinal.

Las dos alas, planos fijos, estuvieran conectados entre sí, y adosados al zuncho de soporte.

Por simplicidad estructural y de fabricación, se construirán con una única lamina de aluminio conformada en su zona central para formar un semi-zuncho que se adosara al cilindro de AUV:



Ilustración 8 Alas de planeo para el submarino. Fuente Propia.

Tanto el extremo de proa, como el de popa, del cuerpo cilíndrico del AUV tendrán unos carenados adicionales, postizos, que mejoren la hidrodinámica. Serán ligeros y no estructurales.

Los planos fijos estabilizadores podrían ser de material relativamente simple. En principio la exigencia de resistencia estructural es pequeña, pero siendo cierto que es un elemento esencial en la maniobrabilidad, habrá que dotarlo

de resistencia suficiente ante cualquier impacto accidental.

Unas planchas de aluminio podrían ser el material adecuado. A esas alas le añadiremos un carenado hidrodinámico (postizo) en su borde de ataque, si ello mejora su comportamiento.

Por otro lado, los planos estabilizadores pueden ser un lugar adecuado para poner el lastre fijo necesario para equilibrar al AUV.

En efecto, el lastre fijo es necesario ya que, en equilibrio, el volumen desplazado por el cilindro estanco ha de ser igualado con el peso de los elementos que constituyen el GLIDER. Ese volumen es de unos 4 litros, por lo que el peso total ha de ser del orden de 4 kg. Eso es mucho más que el peso de los elementos previstos para ser transportados como estructura, mecanismo y carga útil.

Por eso hay que incluir lastre. Además, es previsible que según la misión sea necesario modificar levemente la posición o la cantidad del lastre incorporado. Por ello ha de ser fácilmente accesible y de fácil manejo.

El interior del cilindro lo reservamos como el volumen de mayor calidad, disponible para el equipamiento y la carga útil (payload), y en consecuencia el lastre irá en el exterior.

También atendiendo a los elementos de mayor densidad y peso, si los motores van en el tercio de proa, es adecuado que las baterías vayan en el tercio de popa, y el lastre podría ir concentrado en las alas. Al final, el centro de gravedad del AUV (CDG, G) debe estar en la misma posición longitudinal que el centro de flotabilidad (B), y por la forma alargada del GLIDER, eso se situará hacia la mitad de la eslora.

Los elementos interiores descritos pueden agruparse en módulos funcionales y constructivos, de modo que puedan extraerse e introducirse en el cilindro como un conjunto pre-ensamblado.

Para facilitar esa función prepararemos unos bastidores adecuados que diseñaremos en CAD, e imprimiremos en una impresora 3D.

Las estructuras impresas en 3D pueden ser muy versátiles. El material es ligero, y las formas definidas con un CAD pueden ser todo lo elegantes, funcionales y estéticas que el diseñador esté dispuesto a aportar.

Los bastidores que resulten ayudarán a ordenar y posicionar con precisión todos y cada uno de los elementos interiores, de modo que el equilibrio cuidadoso de pesos y posiciones que requiere el AUV no sea modificable involuntariamente.

El **siguiente esquema** sobre la disposición general ilustra este apartado. La proa se representa a la izquierda, y la popa, a la derecha, termina con la tapa estanca.

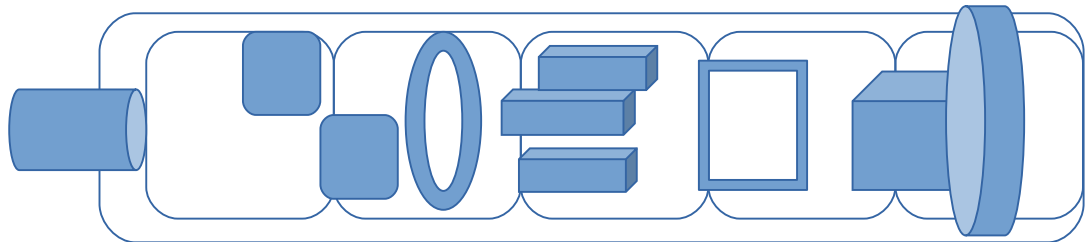


Ilustración 9 Esquema de disposición inicial. Fuente Propia.

3.3 Algunos ejemplos de piezas desarrolladas y construidas.

3.3.1 Las alas del GLIDER.

Después de los estudio teóricos donde estimábamos valores de envergadura, cuerda, superficie alar, rendimiento del perfil del ala, etc, para valorar el comportamiento aerodinámico del GLIDER, llega el momento de construirlo. Para materializar las alas hemos hecho uso de ciertos materiales que teníamos disponibles . Eso ha condicionado bastante lo que vamos a hacer realmente.

Hemos conseguido una lámina de aluminio de dimensiones 1000 x 90 x 1.46 mm, que va a constituir el 'cuerpo' del ala. Se tomará como un ala continua, de lado a lado, y en su zona central, haremos una curva en forma de semicircunferencia que permita adosar ese lámina al cilindro, en forma de zuncho, que se cerrará por la otra semicircunferencia del cilindro con alguna otra pieza adecuada.

Esa lámina de aluminio tiene mucha rigidez en su plano, pero muy poca en la dirección perpendicular a ella. Por tanto, la dotaremos de una estructura auxiliar que cubra esa carencia.

El conjunto acabado tendrá la rigidez adecuada para poder manipular todo el peso del GLIDER agarrándolo por las alas, e incluso sólo por una de ellas. Eso es uno de los objetivos prioritarios en este diseño.

Otro de los objetivos es que las alas tengan poco peso, para que el conjunto no supere demasiado el peso del puro volumen desplazado por el cilindro. Además de lo anterior deseamos que las alas puedan ponerse y quitarse con facilidad del cilindro, para su transporte, plegado, etc.

La forma en que vamos a rigidizar la lámina será añadiendo a lo largo de su longitud por arriba y por abajo (en ambas caras) unos tubos estructurales de carbono de gran rigidez, de los que se utilizan como fuste de las flechas modernas de tiro con arco. Esos tubos son relativamente baratos, y su disponibilidad es grande en el comercio de deportes.

Para afianzar esos perfiles longitudinales a la propia lámina usaremos unas 'costillas' que se fijarán con tornillos pasantes a la lámina, y tendrán su cuerpo taladrado al diámetro ajustado a esos tubos longitudinales.

El resultado se comporta como una viga compuesta, con un perfil relativamente bajo, y una rigidez moderada conseguido con pocos materiales, simple de armar, y con posibilidades de modificaciones futuras, según se vaya comprobando su comportamiento en la navegación.

3.3.2 Algunas fotos del concepto, del diseño CAD, y de la realización material

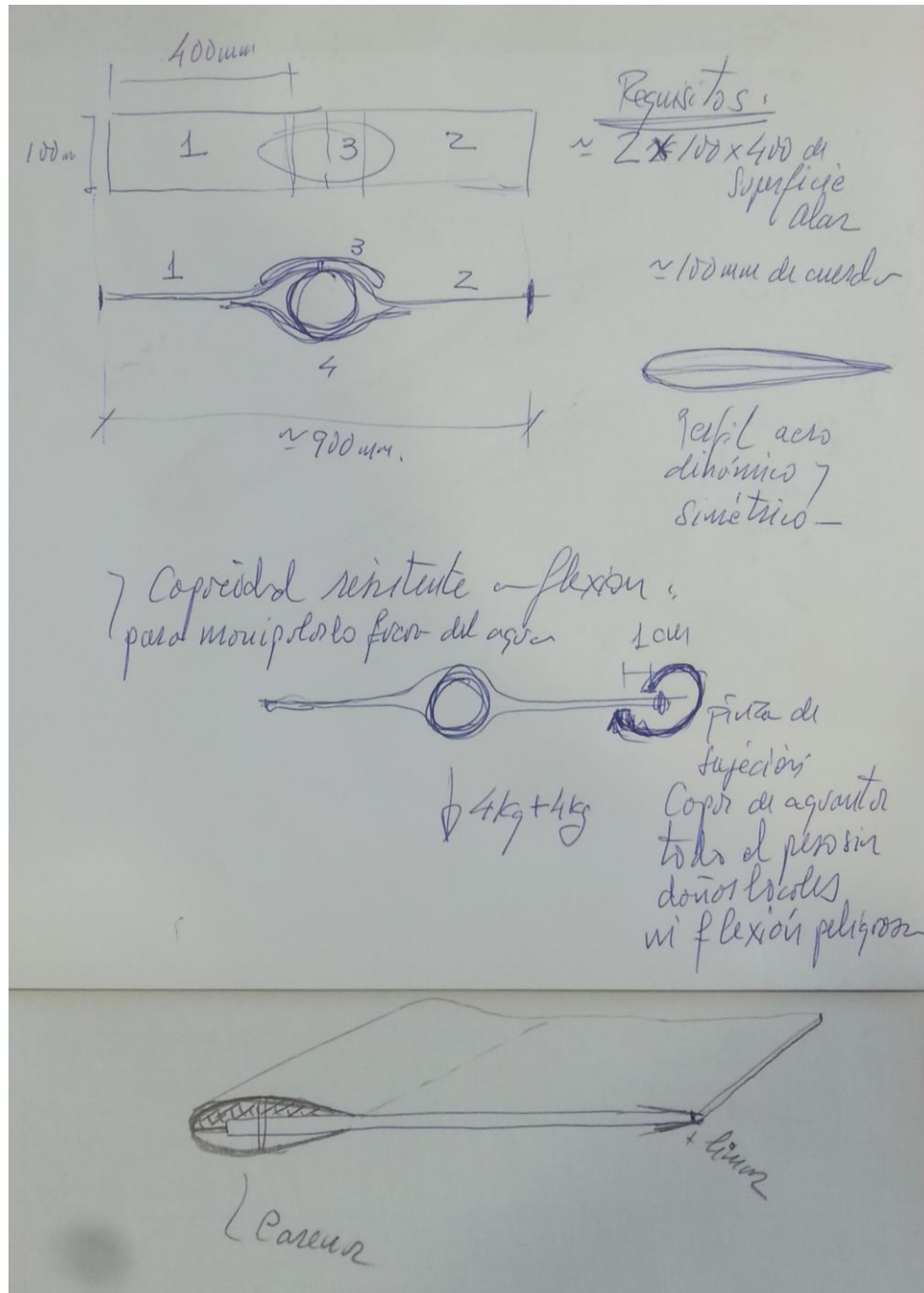


Ilustración 10 Dibujo a mano alzada sobre sistema de alas. Fuente Propia.

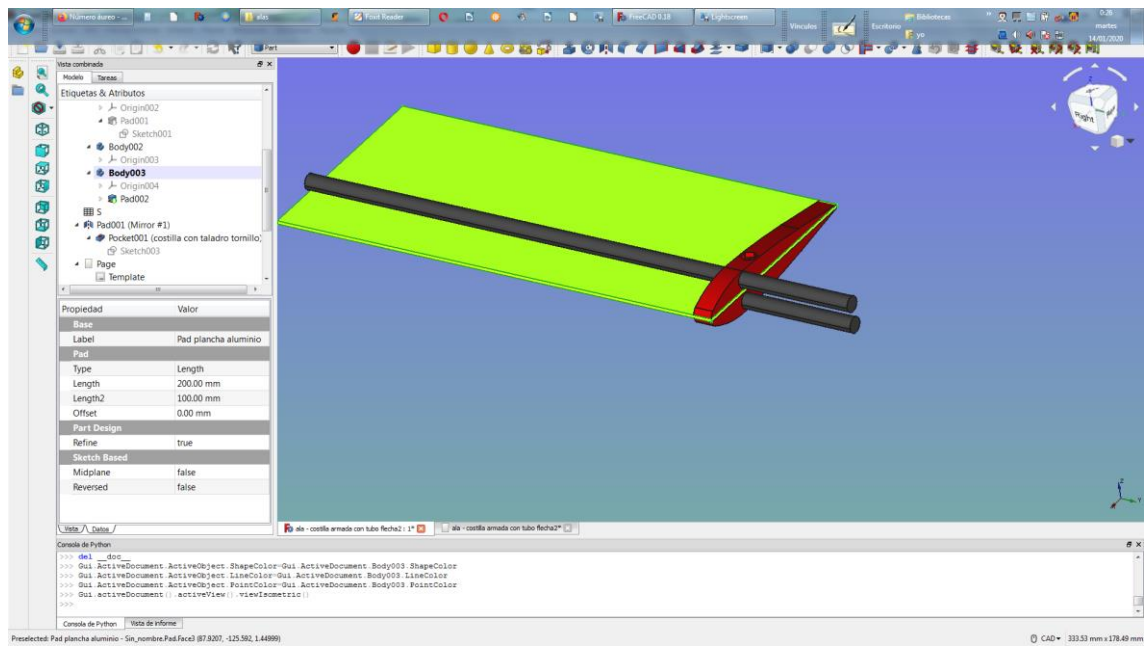


Ilustración 11 Colocación de varillas y soportes de alas. Fuente Propia.

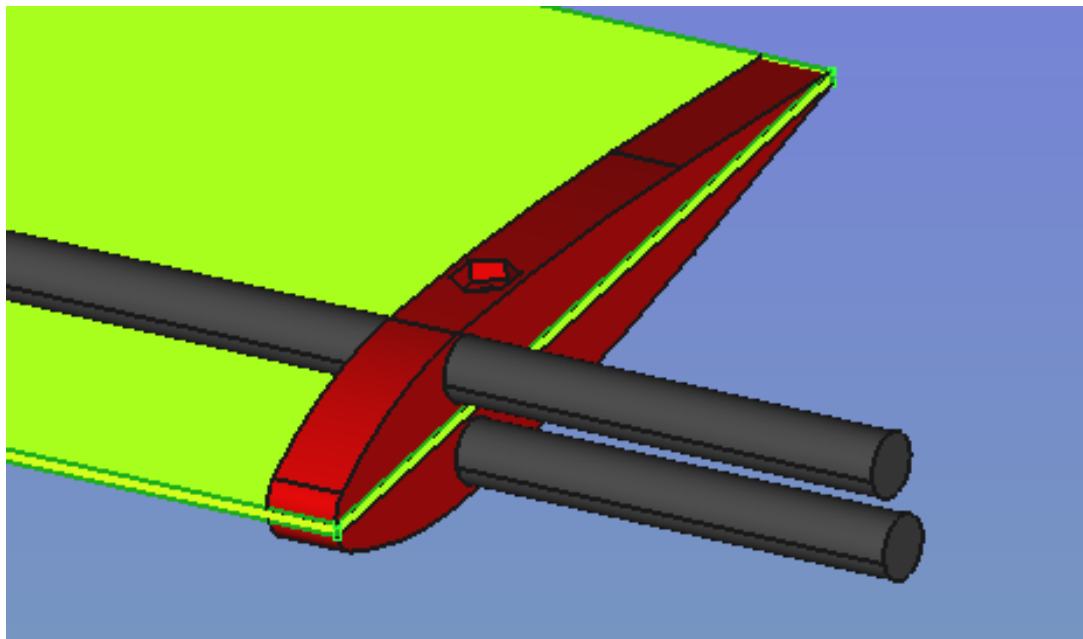


Ilustración 12 Ampliación Ilustración 11. Fuente Propia.

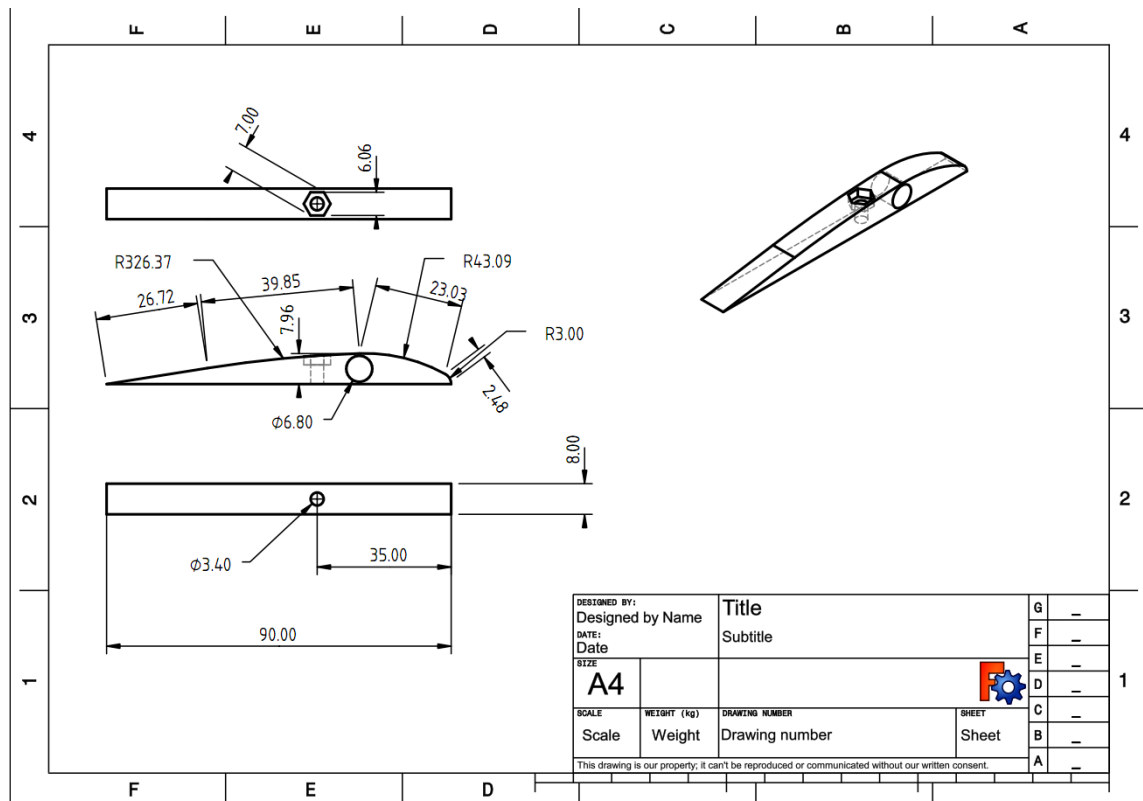


Ilustración 13 Plano del diseños de soportes de alas. Fuente Propia.



Ilustración 14 Sobre impresión de soportes de alas. Fuente Propia.

Imprimir las costillas en la impresora 3D prusa i3Steel con los parámetros para calidad y precisión que hemos elegido consume su tiempo.

Un lote de 4 piezas impresas simultáneamente tarda unos $4 \times 20 = 80$ minutos:
1h 20 m



Ilustración 15 Perspectiva 1 Colocación real de los soportes de alas. Fuente Propia.

En la imagen se ve un ejemplo de una pareja de costillas unidas por el tornillo que las solidariza a la plancha. En esta foto en lugar de la plancha se ha colocado un pedazo de chapa pequeño, para que permita ver el concepto y sea manejable en estas fotos. La lámina real de aluminio que se usará está debajo, a modo de referencia.



Ilustración 16 Perspectiva 2 de la colocación de los soportes de alas. Fuente Propia.

Los tubos de carbono son pasantes a través del agujero realizado en las costillas. Una vez consolidado todo, con varias parejas de costillas (pongamos por ejemplo 3-4 en cada semi-ala de unos 40 cm de longitud), el módulo resistente a flexión de las alas será suficiente para manipular con seguridad el AUV fuera del agua.

Salvando las diferencias, el modelo resistente es similar al de varengas y longitudinales, y el forro exterior, en la estructura de un casco de un barco de acero.

El momento flector máximo que debe soportar cada semi-ala se produce en su encuentro con el zuncho que abraza al cuerpo del AUV. Haremos que esa unión se comporte con la rigidez asimilable a un empotramiento, para lo cual crearemos una forma adecuada.



Ilustración 17 Perspectiva 3 de colocación de soporte de alas. Fuente Propia.

El conjunto de 2 costillas simétricas pareadas alrededor de la chapa se asemeja (porque así lo hemos deseado) a un perfil NACA 0020, es decir simétrico, con una relación de aspecto espesor/cuerda del 20%. ($18 \text{ mm}/90 \text{ mm} = 2/10 = 0.20$).

Ese ratio es un poco elevado, pero es lo que nos ha resultado para los materiales de que disponíamos, y por otro lado, tiene unas cualidades que podemos aprovechar.

3.3.3 Sobre la relación de aspecto del perfil de ala

Los perfiles de relación de aspecto elevada (mayor que 12), como el nuestro, son adecuados para piezas como timones de barco, porque son muy ‘estables’ ante el desprendimiento de flujo, incluso a grandes ángulos. Eso en un timón es fundamental, y en nuestro GLIDER también. Veamos cómo y por qué.

Cuando el AUV parte de reposo en la superficie, y se modifica su flotabilidad, haciéndolo pesado, el AUV empieza a caer y a la vez cambia lentamente el trimado bajando la proa respecto a la popa. Durante ese inicio el movimiento

es lento, pero el ángulo de ataque es grande. Si el perfil no fuera grueso, tendría más dificultad en establecer el inicio de la sustentación y podría estar en pérdida durante un buen tramo. Por contra, este perfil grueso enseguida empieza a sustentar y a crear el movimiento de planeo que se busca. Ciertamente la relación CL/CD no es tan alta como en perfiles finos, pero en principio nos parece conveniente sacrificar algo de velocidad y ángulo de la senda de planeo, en favor de 'arrancar' el vuelo en menos tiempo.

Cuando el AUV GLIDER llegue a la cota de inmersión límite, deberá cambiar la flotabilidad e iniciar el camino inverso hacia la superficie. Durante esa maniobra, la velocidad se reduce y puede llegar a ser casi nula. Y a la vez, el trimado se invierte. Y nuevamente volvemos estar en un momento crítico en el que hay que volver a 'arrancar' el AUV desde el fondo, y vuelve a ser fundamental la capacidad del perfil para restablecer la sustentación con la mínima velocidad y pese a un ángulo de ataque elevado.

Esas son las cualidades deseables para que el GLIDER puede maniobrar correctamente.

Desde luego, el tiempo que se tarde en cambiar la flotabilidad de positiva a negativa es determinante en la velocidad que se pierde al final del descenso. Cuanto más lenta sea esa maniobra más velocidad se pierde, y peor será el proceso de inversión del movimiento alternante de navegación arriba y abajo (NAA). El proceso es asimilable a una virada por proa en un velero con vela latina. Si el giro es lento, se perderá mucha velocidad, y antes de que vuelva a 'arrancar' amurado a la nueva banda se creará mucho abatimiento, que habrá que negociar modificando (aumentando) el embolsamiento y reduciendo el ángulo de ataque de la vela-perfil, cambiando el rumbo al través del viento, hasta que empiece a adquirir sustentación, y progresivamente llevando nuevamente la proa hacia el viento a la vez que se reduce embolsamiento y ángulo de ataque, y se gana velocidad.

Las velas latinas se comportan como perfiles de geometría variable (relación de aspecto-embolsamiento), mientras que nuestras alas son de geometría fija,

por ello, entre las situaciones posibles deberemos ajustar, por prueba y error, cuales son las características reales más adecuadas.

El tiempo de cambio de actitud (Arriba-Abajo, AA), depende de la potencia del motor de accionamiento del husillo de la cámara de flotabilidad. También es un parámetro con limitaciones a la hora de construir nuestro prototipo. Los motores pequeños suelen tener potencias pequeñas.

Las costillas no aportan sustentación, pero nos señalan cual es la forma que deberá tener el forro que se les ponga. Ese forro lo dejaremos para el final, cuando veamos el comportamiento real del AUV en navegación.

Las alas son huecas, y los tubos de carbono también. Para no someter esa estructura a presiones que las pueden deformar, tendremos que asegurarnos de que todas las estructuras huecas que no estén diseñadas específicamente para resistir presión hidrostática tengan agujeros colocados adecuadamente por donde pueda salir el aire, de modo que no quede atrapado.

Reynolds number calculator

Ad closed by Google

Velocity	<input type="text" value="0.05"/>	m/s	0.11185 mph	0.18 kph
Chord width	<input type="text" value="0.09"/>	m	0.29528 ft	3.5433 in
Kinematic Viscosity	<input type="text" value="9.7937E-7"/>	m ² /s	1.054e-5 ft ² /s	
Reynolds Number	4,595			
<input type="button" value="Calculate"/>				

Reynolds number calculation

The Reynolds number is a dimensionless value that measures the ratio of inertial forces to viscous forces and describes the degree of laminar or turbulent flow. Systems that operate at the same Reynolds number will have the same flow characteristics even if the fluid, speed and characteristic lengths vary.

The Reynolds number is calculated from:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

Where:

- v = Velocity of the fluid
- l = The characteristics length, the chord width of an airfoil
- ρ = The density of the fluid
- μ = The dynamic viscosity of the fluid
- ν = The kinematic viscosity of the fluid

Kinematic Viscosity

Example kinematic viscosity values for air and water at 1 atm and various temperatures.

Air

Kinematic Viscosity m ² /s	°C	°F	
1.2462E-5	-10	14	<input type="button" value="Use"/>
1.3324E-5	0	32	<input type="button" value="Use"/>
1.4207E-5	10	50	<input type="button" value="Use"/>
1.5111E-5	20	68	<input type="button" value="Use"/>

Water

Kinematic Viscosity m ² /s	°C	°F	
1.6438E-6	1	33.8	<input type="button" value="Use"/>
1.267E-6	10	50	<input type="button" value="Use"/>
9.7937E-7	20	68	<input type="button" value="Use"/>

Ilustración 18 Reynolds number calculation 1. Reynolds number.

- Ncrit value - This is used to model of the turbulence of the fluid or roughness of the airfoil. The [Xfoil documentation](#) has a section explaining the method and also the table (reproduced below) of suggested values:-

Situation	Ncrit
sailplane	12 to 14
motorglider	11 to 13
clean wind tunnel	10 to 12
average wind tunnel	9
dirty wind tunnel	4 to 8

Ilustración 19 Reynolds number calculation 2

The Ncrit value is a measure of free flow turbulence and is used to simulate the transition location when no forced trip location is given. XFLR5 uses [the same method as XFOIL](#), which is an adaptation of the [e^N transition theory](#). Note this linear theory loses its validity at a fluctuation level of 1 to 1.5 percent, which corresponds to an N-factor of 6.9 to 7.3, meaning it is not suitable for highly turbulent flows.

As to what this is important for, the turbulent or laminar nature of the boundary layer affects flow separation and viscous drag. A turbulent layer will generate more drag, but separate at higher airfoil angles of attack.

Where this gets really interesting is at low Reynolds numbers, where a laminar layer will detach, but become reattached if turbulence is introduced into the airflow ahead of the airfoil, such as by a turbulator. It will then remain attached if the turbulator is removed, displaying a hysteresis loop. The same effect will of course occur in the opposite direction, with a barely attached turbulent layer detaching and staying that way if the free flow turbulence decreases enough to cause it to turn laminar.

I must note that this effect is confined to low Reynolds numbers, on the order of 10^4 .

Ilustración 20 Reynolds number calculation 3. Reynolds number.

3.3.4 Algunos números sobre el perfil NACA 0020:

Polar graphs

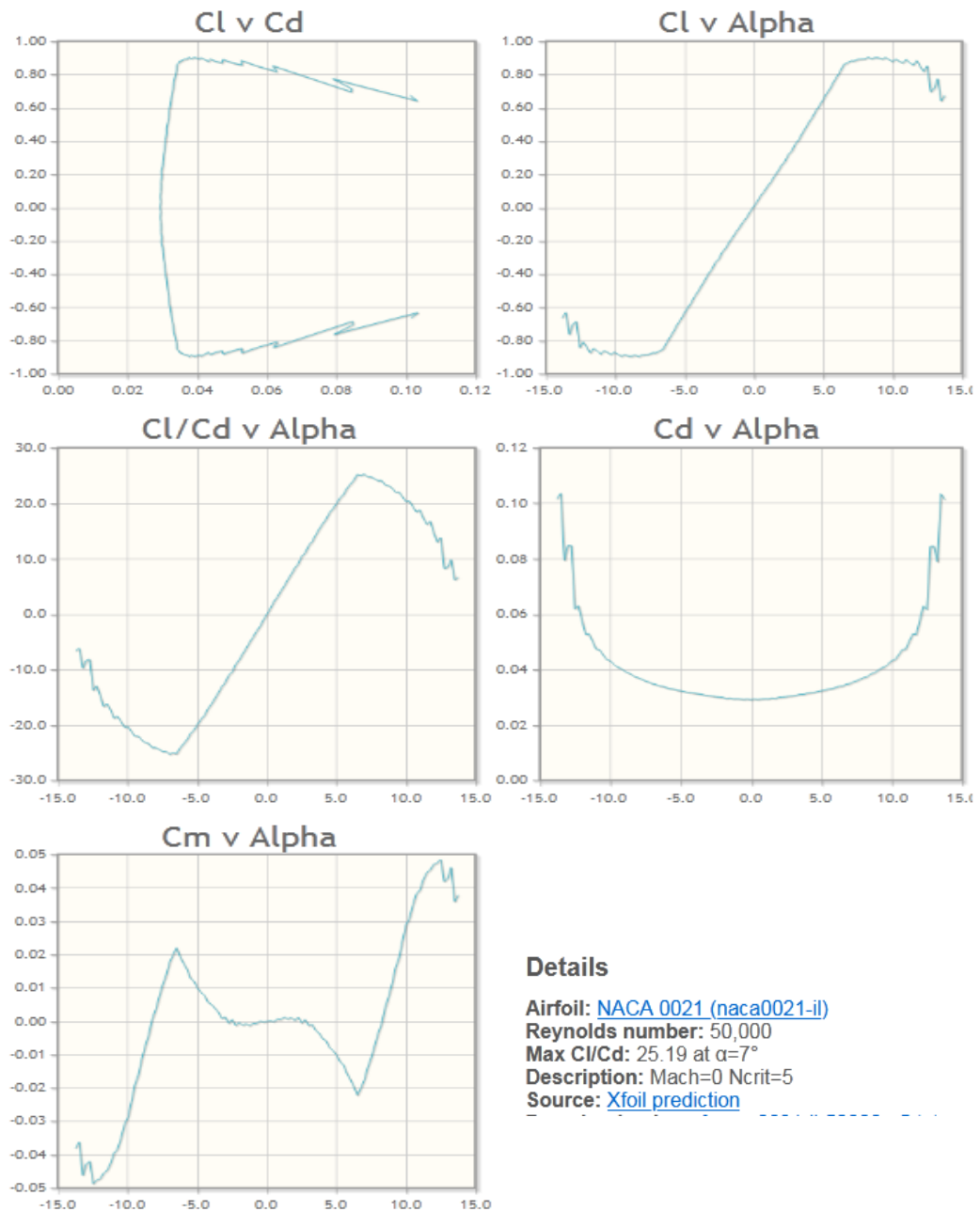


Ilustración 21 Perfil NACA 0020 Rynols number

3.3.5 Detalles en CAD de las piezas de plástico PLA

Las piezas de PLA que se han incorporado a la chapa de aluminio han tenido una elaboración cuidadosa a nivel de su diseño en CAD, aunque el montaje final sobre la placa no ha estado al mismo nivel de calidad del trabajo.

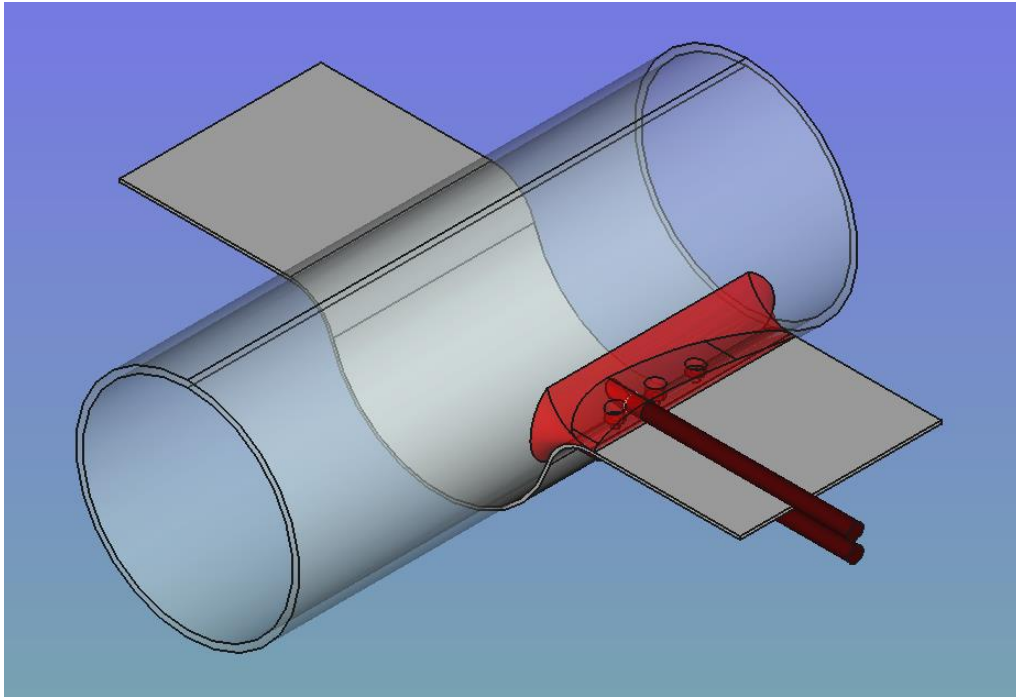


Ilustración 22 Soporte adaptación entre ala y cilindro 1. Fuente Propia.

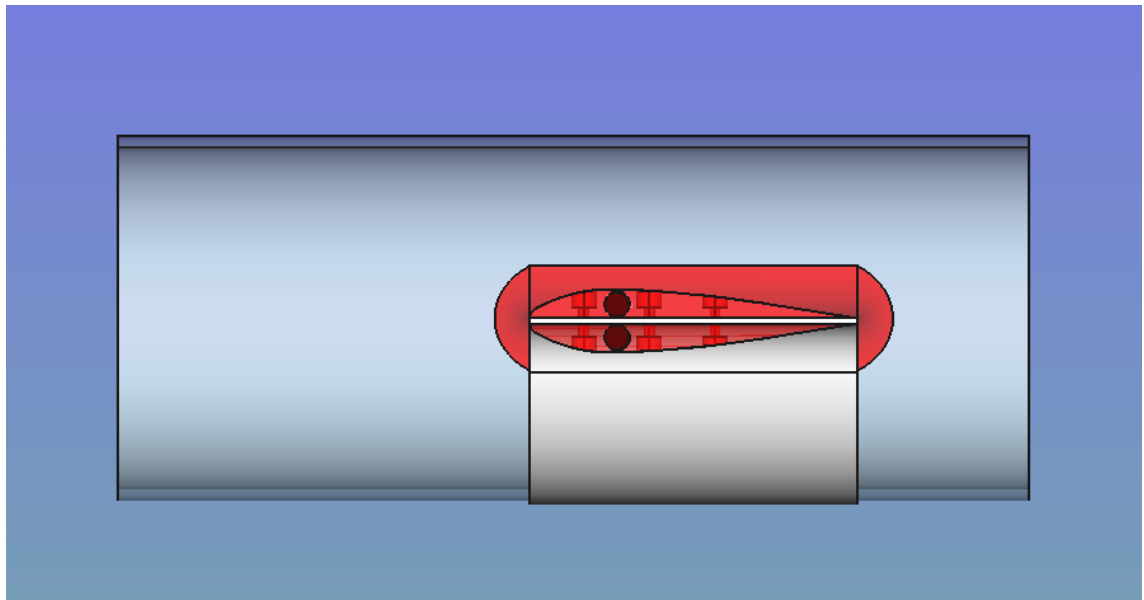


Ilustración 23 Soporte adaptación entre ala y cilindro 2. Fuente Propia.

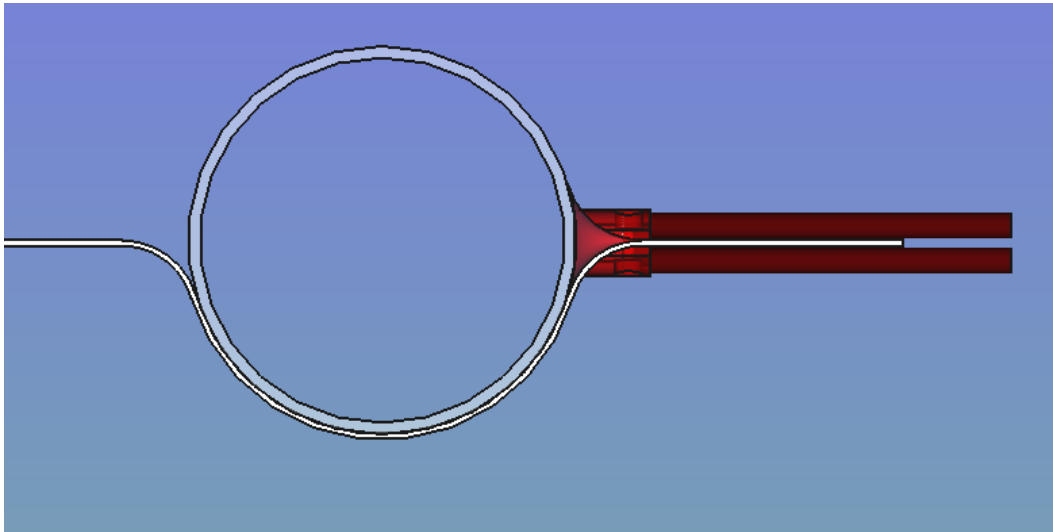


Ilustración 24 Soporte adaptación entre ala y cilindro 3. Fuente Propia.

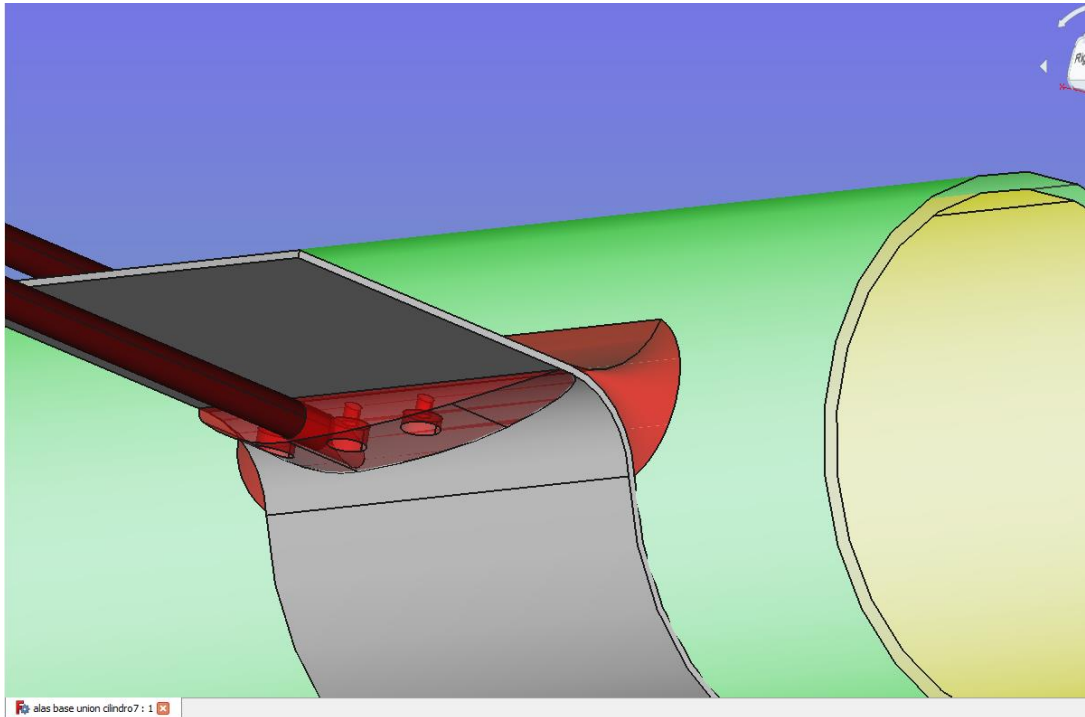


Ilustración 25 Soporte adaptación entre ala y cilindro 4. Fuente Propia.

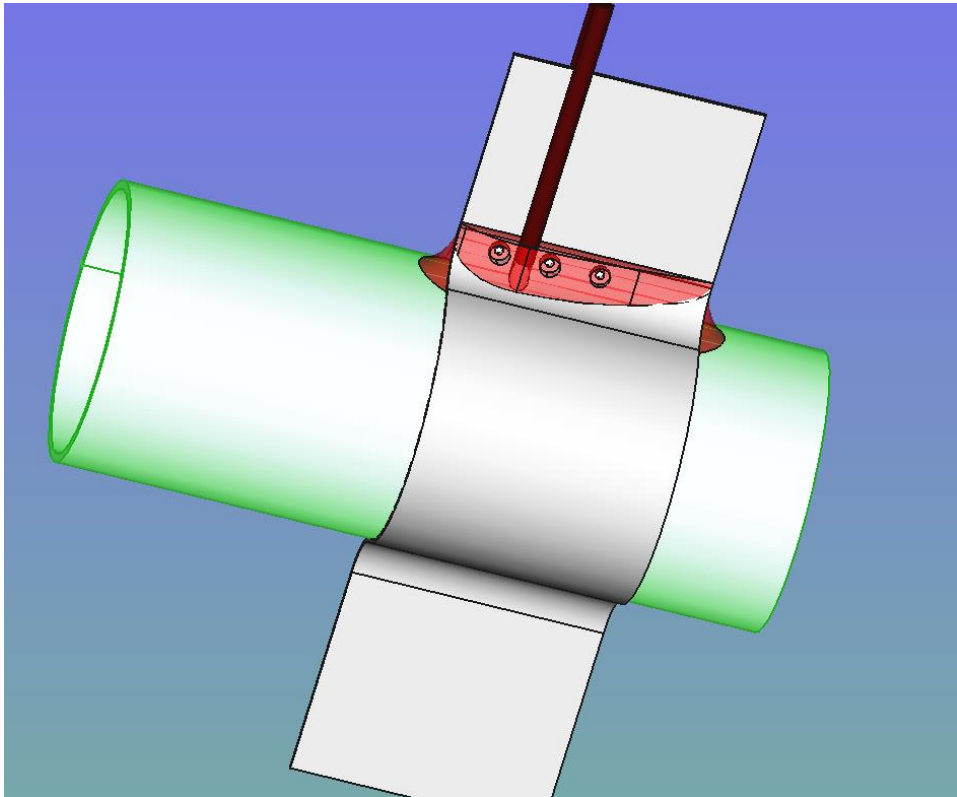


Ilustración 26 Soporte adaptación entre ala y cilindro 5. Fuente Propia.

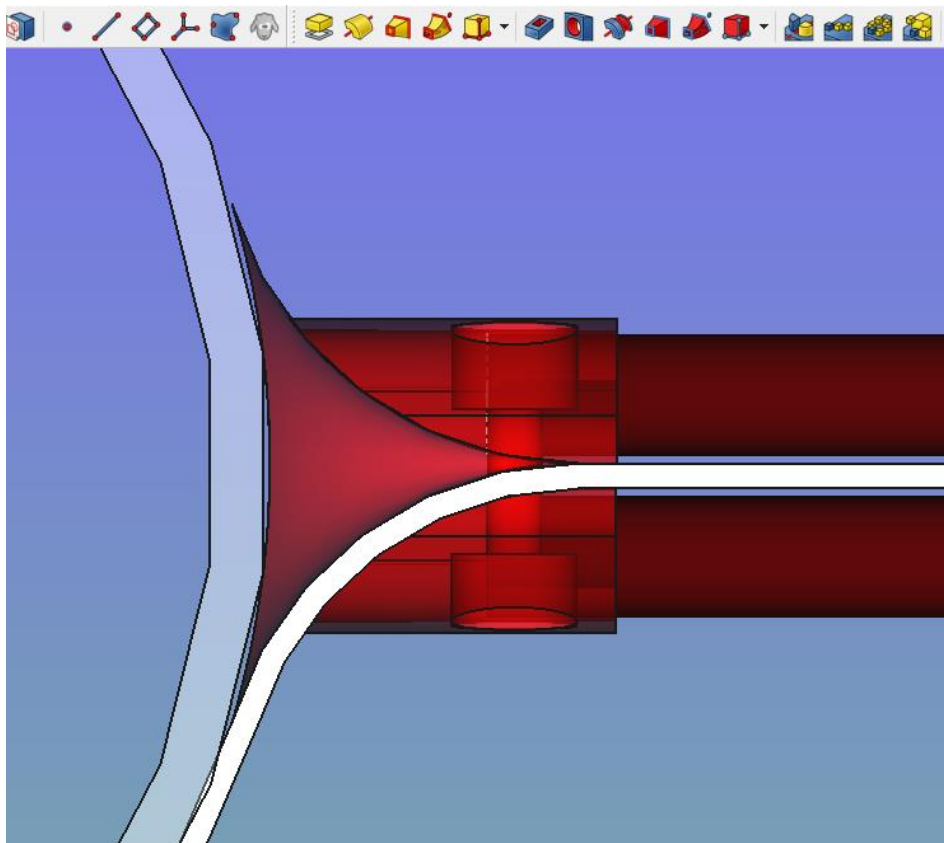


Ilustración 27 Soporte adaptación entre ala y cilindro 6. Fuente Propia.

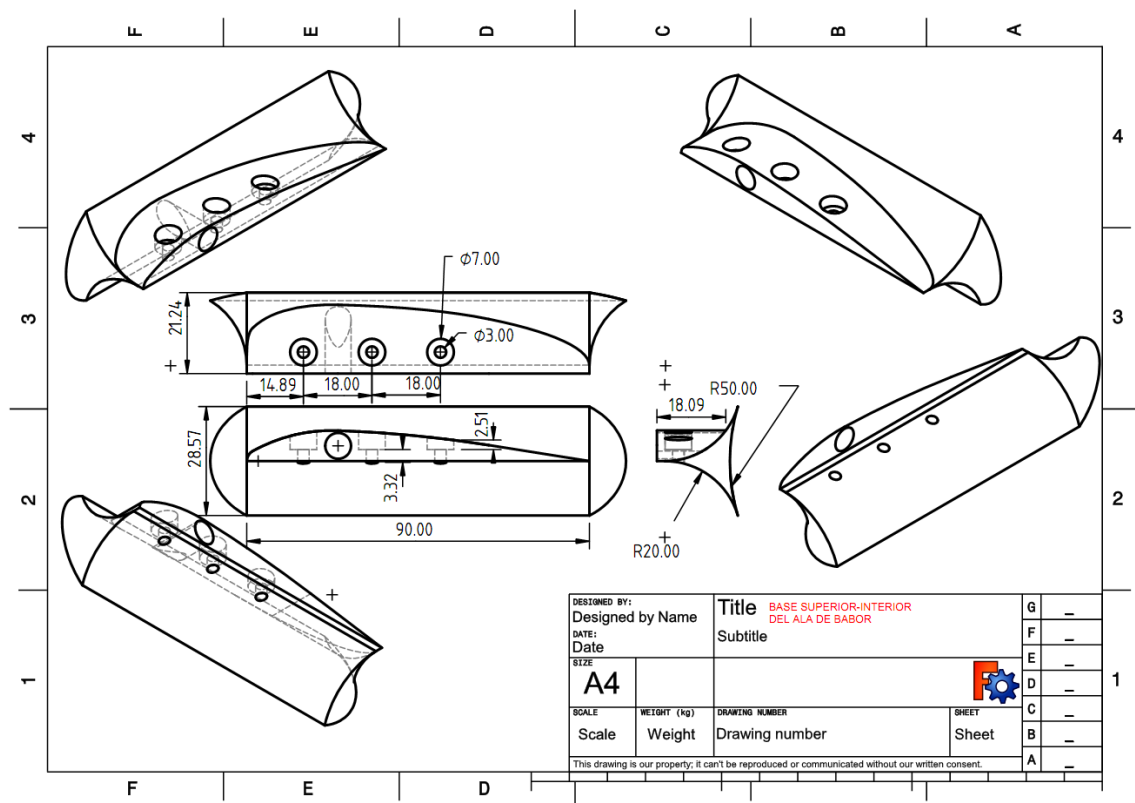


Ilustración 28 Plano soporte adaptación entre alas y cilindro. Fuente Propia.

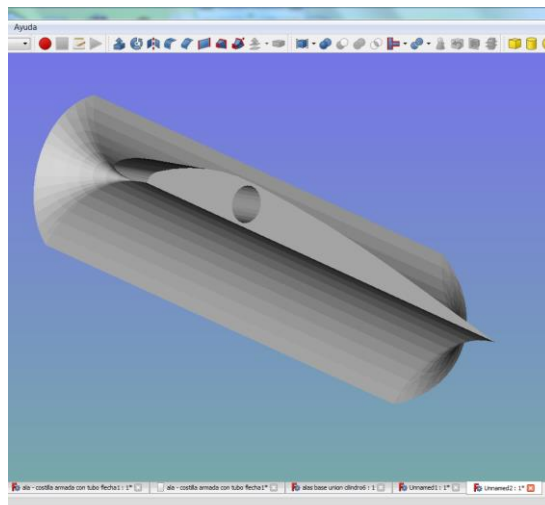


Ilustración 29 Solo perfil de adaptación entre alas y cilindro. Fuente Propia.

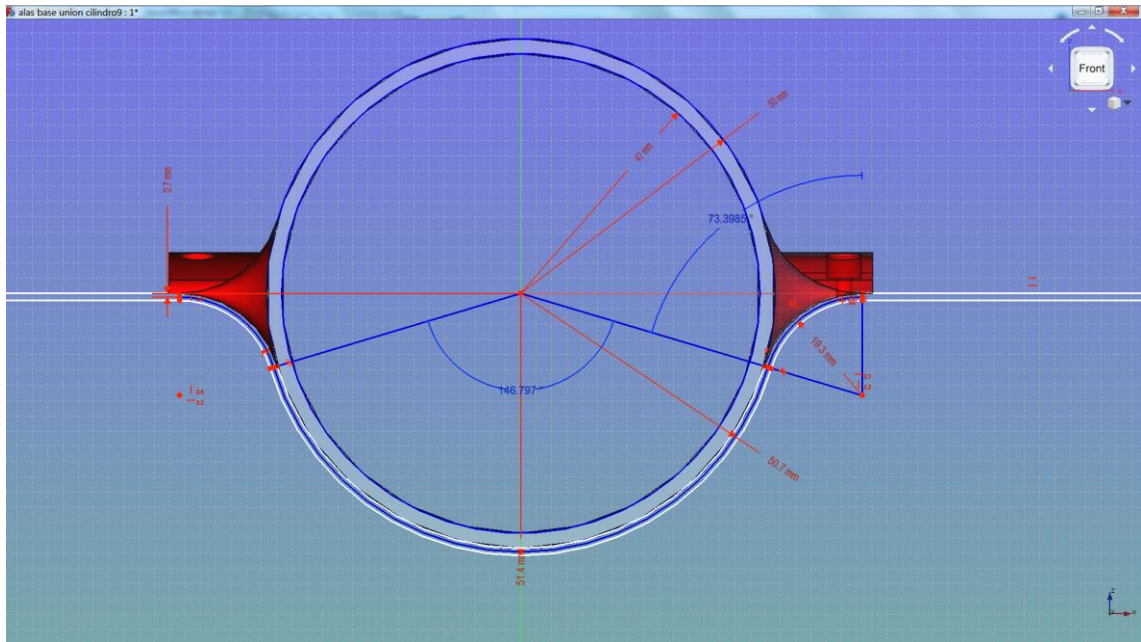


Ilustración 30 Vista frontal entre pieza adaptación alas y cilindro. Fuente Propia.

Croquis donde se aprecia el cálculo del desarrollo sobre la fibra neutra de la chapa de aluminio curvada.

- Los arcos son de 73.4° y su doble, 146.8° ,
- y los radios son de 19.3 mm y 50.7 mm en la fibra neutra de la plancha de 1.4 mm de espesor.

El desarrollo será $\text{arco} = \text{radio} \times \text{ángulo (radianes)}$.

$1.281 \times 19.3 = 24.7 \text{ mm}$, cada uno de los dos arcos pequeños a cada lado

$1.281 \times 2 \times 50.7 = 129.9 \text{ mm}$ el arco central

Estas dimensiones nos permitirían un trazado perfecto de los arcos de circunferencia, al quedar totalmente determinados los extremos de los mismos.

3.3.6 Carenado - Forro de las alas

Por encima de todas las costillas va una lámina de un plástico fino, a modo de piel, que envuelve las alas, carenándolas. El material puede ser un plástico transparente, del tipo acetato de celulosa, o similar. Hemos obtenido uno que el vendedor nos ha descrito como PVC.

Vamos a comprobar el desarrollo que necesitamos sobre esa lámina para que sea una funda bien adaptada.

Para ello partiremos de la última versión del perfil de costilla: la versión v25

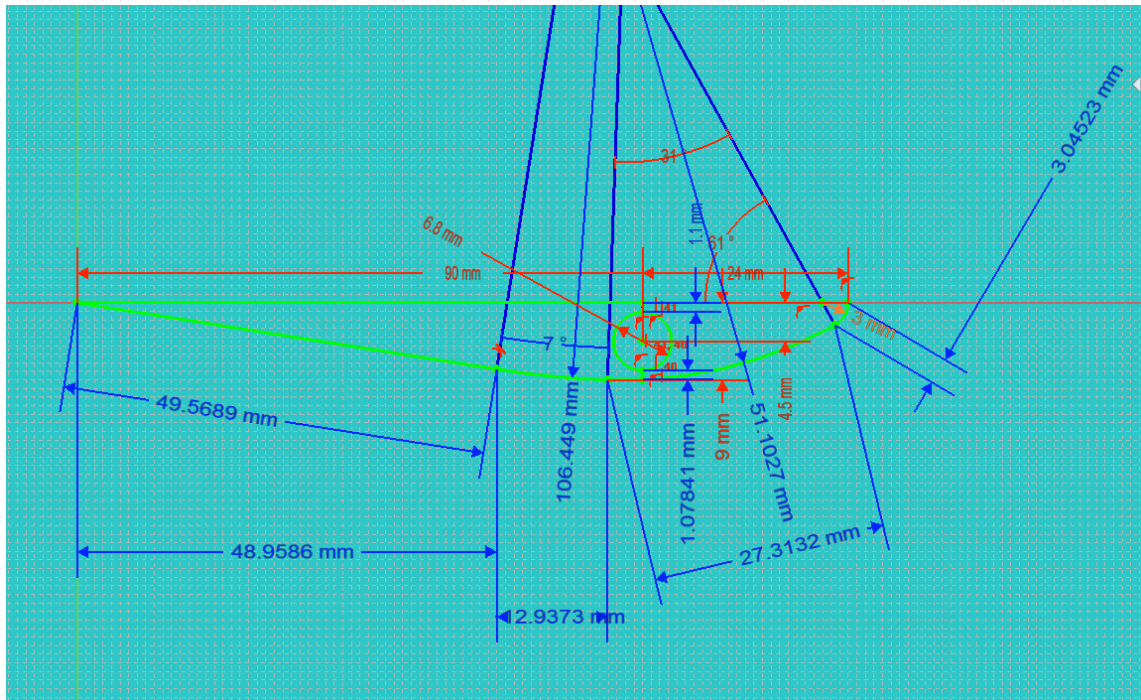


Ilustración 31 Plano de medidas pieza de adaptación. Fuente Propia.

Vamos a calcular la longitud del lado curvo. Los segmentos de arco se calculan como $S = r \cdot \text{teta}$, se añade la cola recta, y el semi-espesor de la plancha de aluminio, y todo ello es la mitad del contorno. El resto es simétrico

Basta añadir un pequeño margen de unos 4 mm, y el conjunto puede construirse a partir de una hoja DIN A4. El forro que envuelve el armazón de costillas se puede obtener doblando/curvando una de esas hojas a lo largo de su eje central, y pegando/grapando sus bordes largos de los lados opuestos a lo largo de una franja de dimensiones 9 mm (que es el sobrante necesario para conseguir el desarrollo calculado anteriormente):

$$188.23 + 4 = 192 \text{ mm}$$

$$210 - 192 = 18 \text{ mm}$$

$$18/2 = 9 \text{ mm}$$

Para lograr que ese forro quede bien ceñido a las alas, se puede tensar tirando/frunciendo desde el borde de salida del ala, justo en cada una de las costillas.

En cuanto a la longitud del ala, se necesitan 2 hojas A4 para cubrir toda la longitud de una semi-ala. Entre las dos piezas debe existir algo de solape para crear una superficie de forma suave en esa zona de unión.

Después de probar el concepto, se constata que el resultado es muy bueno y el conjunto es fácil de montar y ajustar.



Ilustración 32 Foto perfil de alas montadas 1. Fuente Propia.



Ilustración 33 Foto perfil de alas montadas 2. Fuente Propia.

3.3.7 Atado de las alas al cuerpo de AUV

La fijación entre el cilindro – cuerpo de AUV y el zuncho del centro del ala se hace por medio de un cordón elástico que, por seguridad, puede ser doble. El cordón tendría algún tipo de ‘abrochado’ rápido entre sus extremos, para facilitar el poner o quitar el ala para el transporte de AUV. El broche deberá tener una forma hidrodinámica adecuada.

La siguiente foto muestran detalle de vistas superior de la solución de atado del zuncho con una banda elástica.



Ilustración 34 Sujeción de alas con las gomas elásticas. Fuente Propia.

4. Proyecto constructivo.

Desde el punto de vista constructivo en esta parte del proyecto, “estudio técnico”, se ha querido resaltar las partes construidas, para poder dar así una visión del trabajo que se ha realizado.

4.1 Definición y descripción.

Las partes que se han diseñado en este documento son:

- Ojivas de proa y popa
- Tapas estancas de proa y popa para que acoplen las ojivas.
- Diseñado las alas del submarino.
- Sistema de inundación en la tapa de proa.
- Acoplamiento del motor para la cámara de inundación por sistema de engranaje.
- Sistema de escora y de inclinación popa y proa en el mismo carro de movimientos, con un peso el cual es parte del sistema de energía de submarino.
- Lugar de colocaciones del sistema de gobierno.

4.2 Algunos ejemplos de piezas desarrolladas y construidas.

4.2.1 Ojivas de proa y popa.

Las diferencias entre estas dos ojivas, son sus formas, la de proa es más redondeada, con un hueco en su parte frontal para poder inundar la cámara de flotabilidad, la de popa es más afinada para ayudar a la eficiencia en navegación, contiene también una ranura para alojar un ala rígida para ayudar a mantener un rumbo recto.

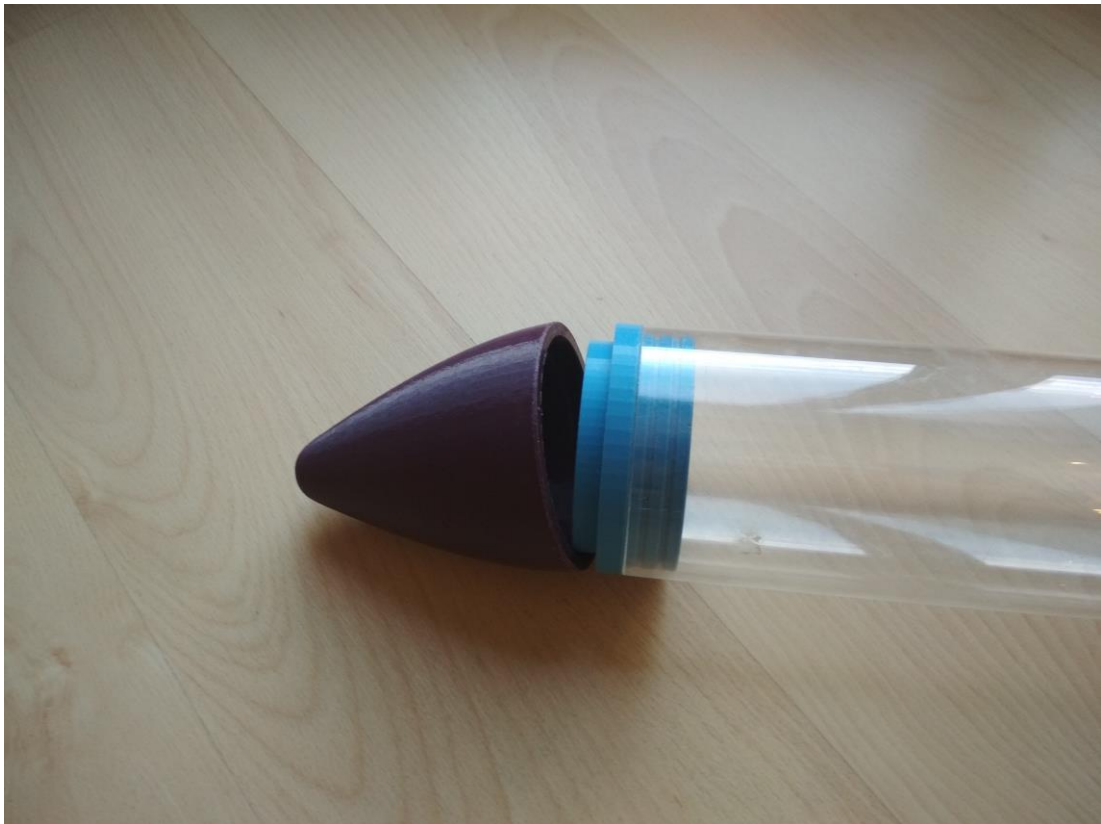


Ilustración 35 Ojiva de popa con tapa estanca.



Ilustración 36 Ojiva de proa con tapa estanca. Fuente Propia.

4.2.2 Tapas estancas de proa y popa.

Las tapas estancas de proa y popa conllevaron un diseño cuidadoso ya que tenían que ser herméticas y no dejar filtrar nada de agua por ellas, (teniendo en cuenta que este tipo de impresión se hace por deposición de material pueden surgir grietas o superficies con una unión inadecuada dejando filtrar el agua entre ellas), como también ser capaces de resistir la presión de agua, ayudar a rigidizar el metacrilato en la zona de proa y popa dándole una estructura de apoyo, también tenían que alojar cajas de juntas toricas para hacer un sello estanco entre el metacrilato y las tapas.

4.2.2.1 Tapa de proa.

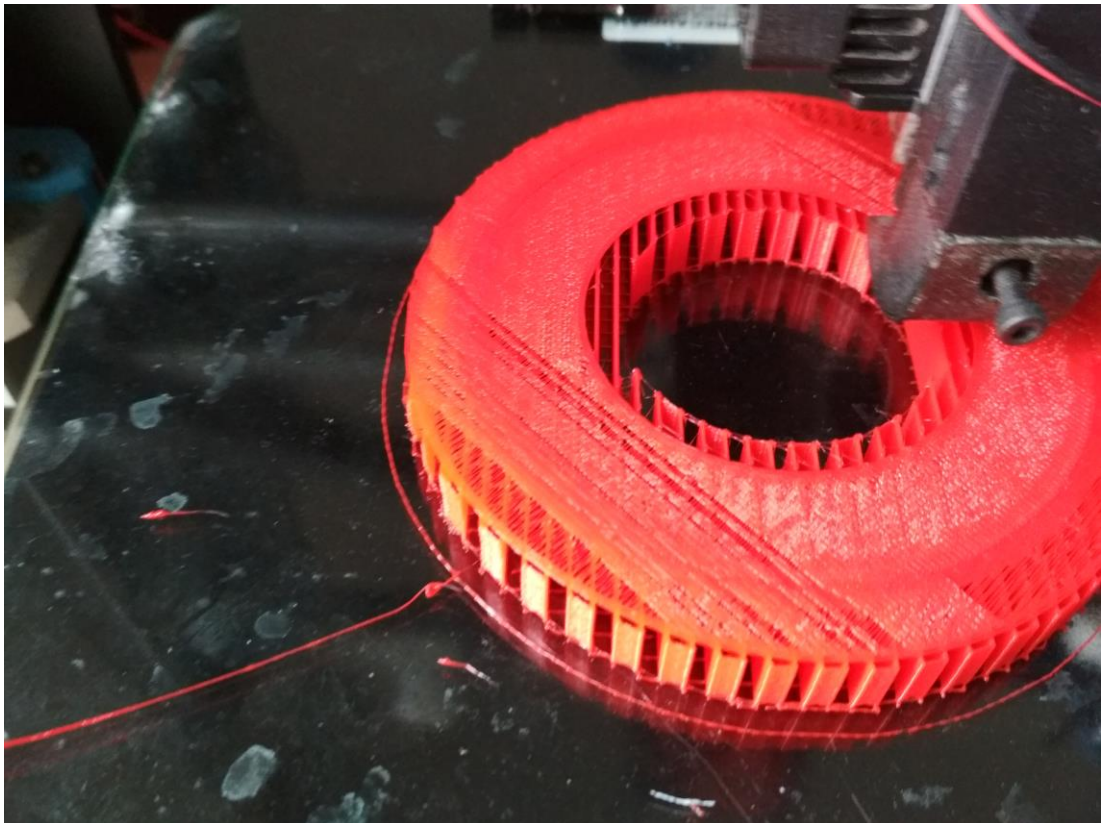


Ilustración 37 Impresión de la tapa de proa en la maquina 1. Fuente Propia.

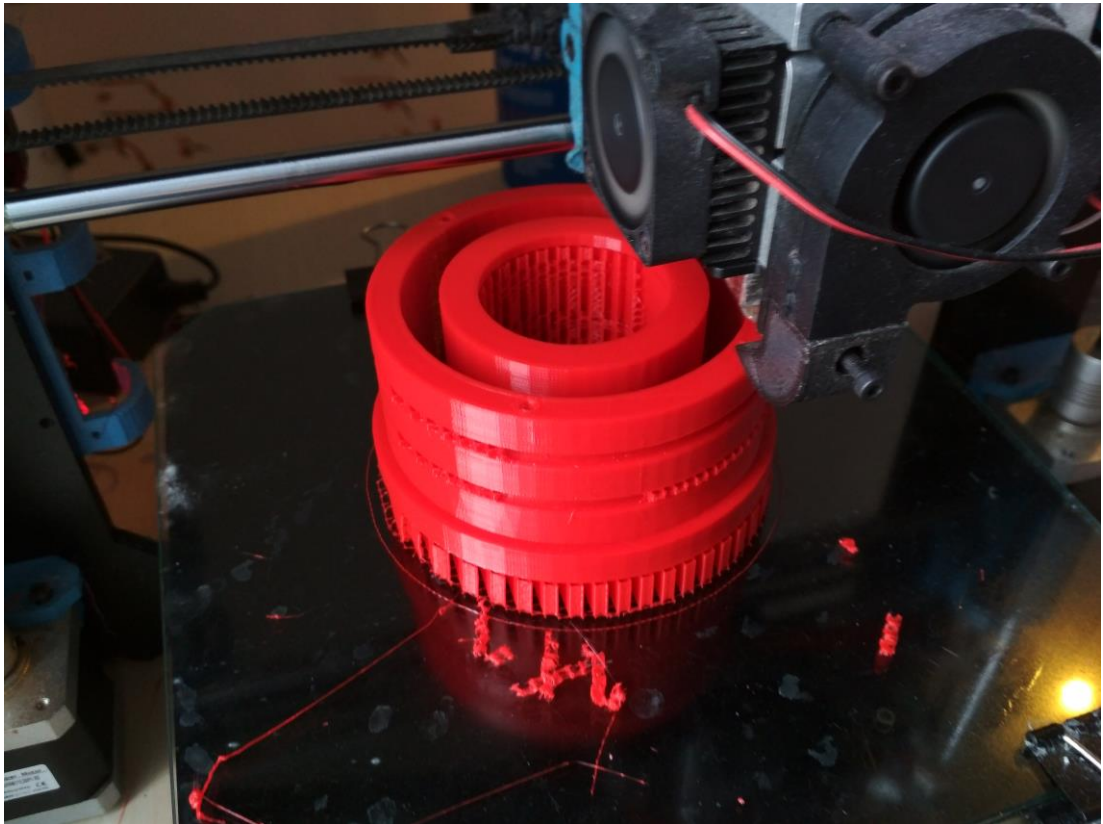


Ilustración 38 Impresión de la tapa de proa en la maquina 2. Fuente Propia.

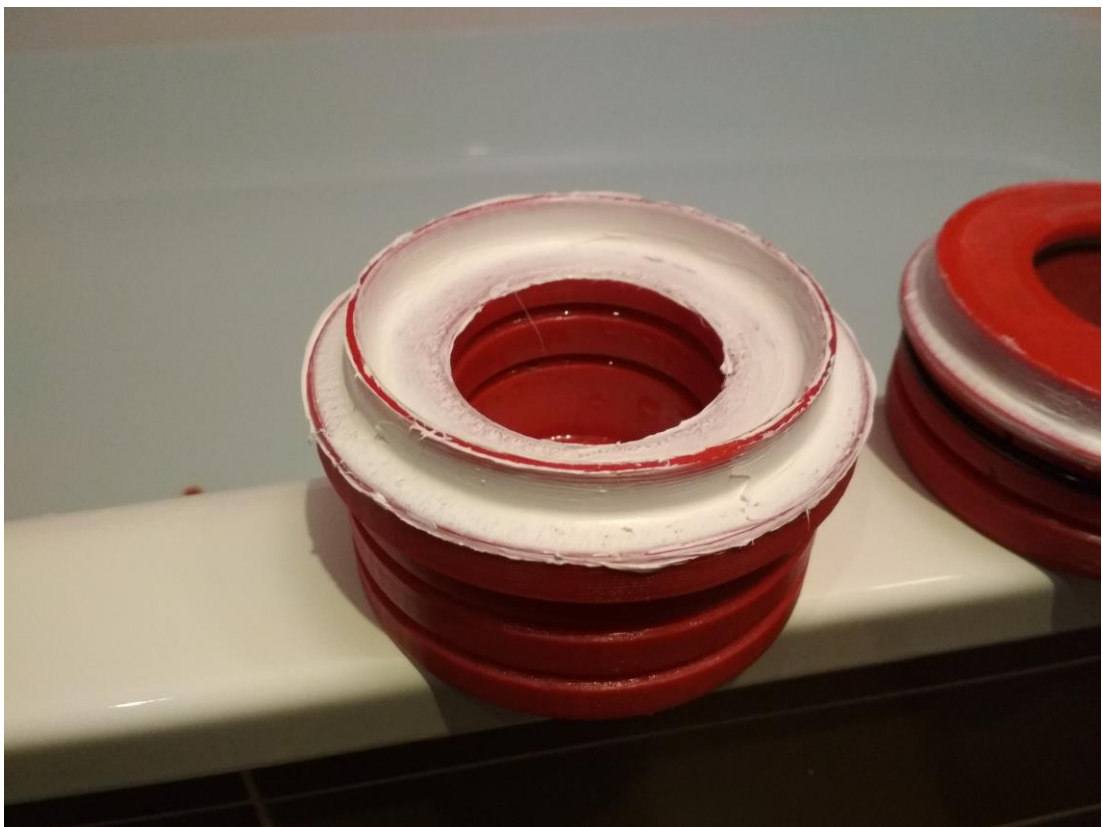


Ilustración 39 Tapa de proa modelo 1. Fuente Propia.



Ilustración 40 Tapa de proa modelo 2. Fuente Propia.



Ilustración 41 Tapa de proa modelo 3 montada. Fuente Propia.



Ilustración 42 Tapa proa se puede ver que las juntas hacen un sello o marcan una huella en el metacrilato deseada. Fuente Propia.

4.2.2.2 Tapa de popa



Ilustración 43 Tapa popa con ojiva. Fuente Propia.

4.2.3 Cámara de flotabilidad y embolo de empuje.

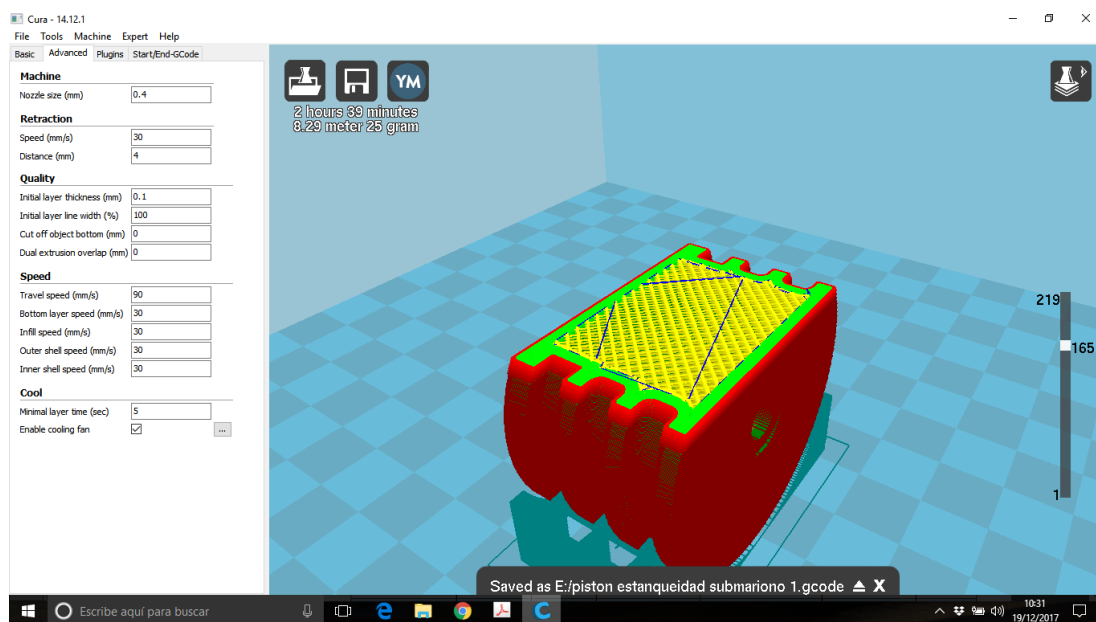


Ilustración 44 Embolo de empuje de la cámara de flotabilidad. Fuente Propia.



Ilustración 45 Embolo puesto insertado en la cámara de flotabilidad. Fuente Propia.

4.2.4 Sistema de propulsión, motor y engranajes.

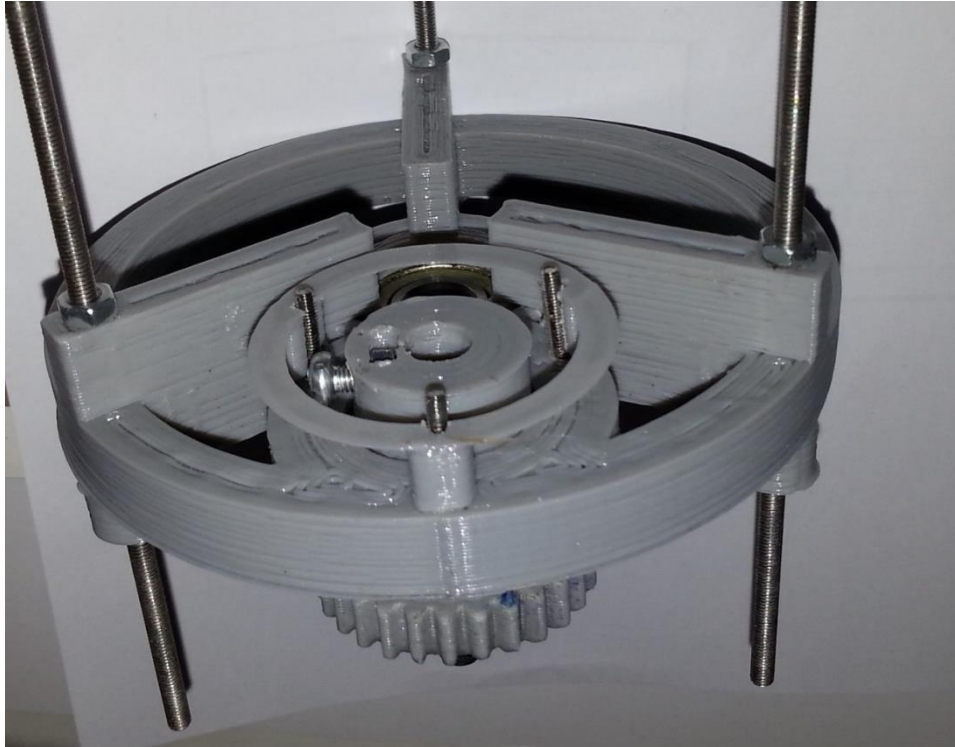


Ilustración 46 Sistema de engranajes para inmersión. Fuente Propia.

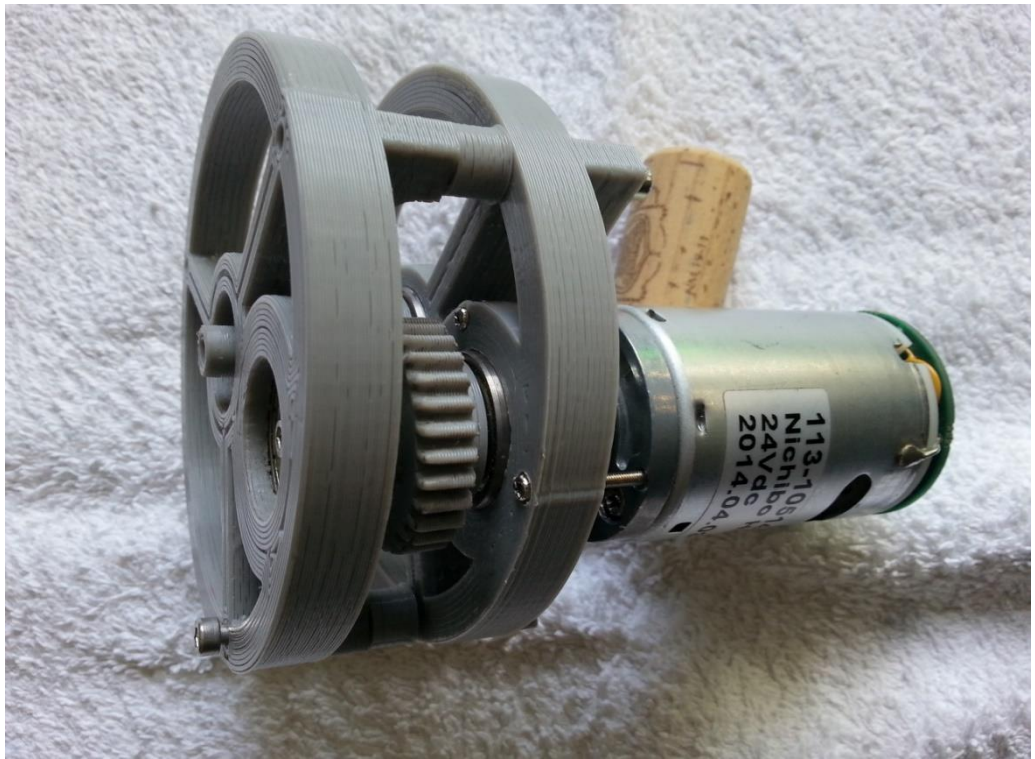


Ilustración 47 Motor y Sistema de engranaje montado. Fuente Propia.



Ilustración 48 Motor y sistema de engranaje montado en la tapa de proa. Fuente Propia.

4.2.5 Alas del GLIDER.

Las imágenes de alas terminadas se pueden ver también en el apartado de alas desde la Ilustración 11 hasta la Ilustración 35. En esta imagen se parecía como queda finalizada, recubierta con el carenado no estructural.



Ilustración 49 Mismas alas del planeador que la figura 35. Fuente Propia.

4.2.6 Imágenes de pruebas de estanqueidad.



Ilustración 50 Prueba de estanqueidad. Fuente Propia.



Ilustración 51 Prueba de estanqueidad continuación. Fuente Propia.

4.2.7 Módulo de cambio de asiento y escora.

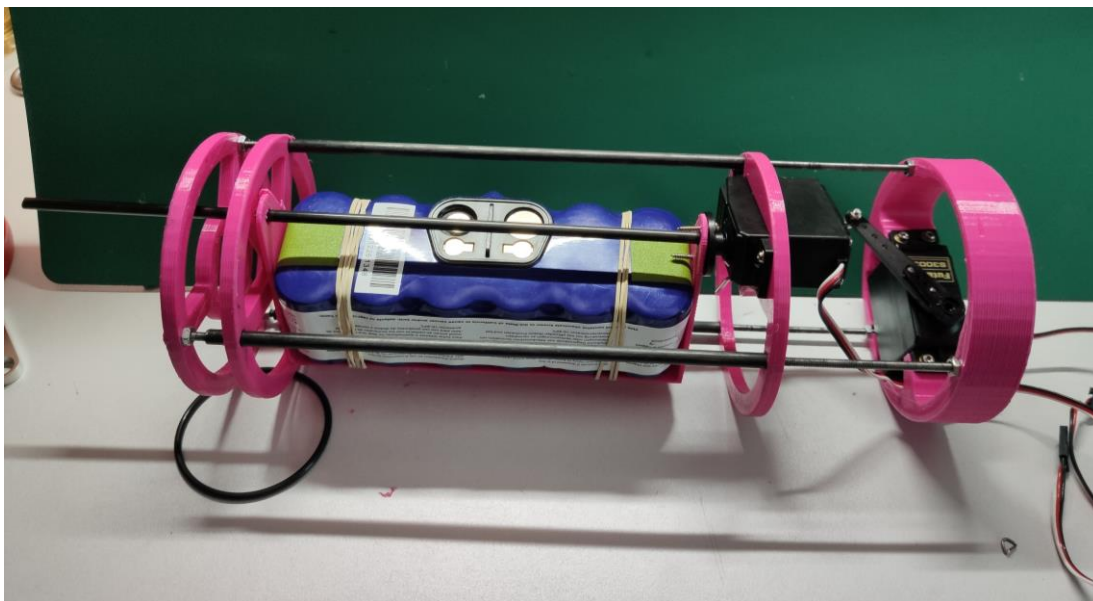


Ilustración 52 Modulo de virada y inclinacion del submarino final. Fuente Propia.

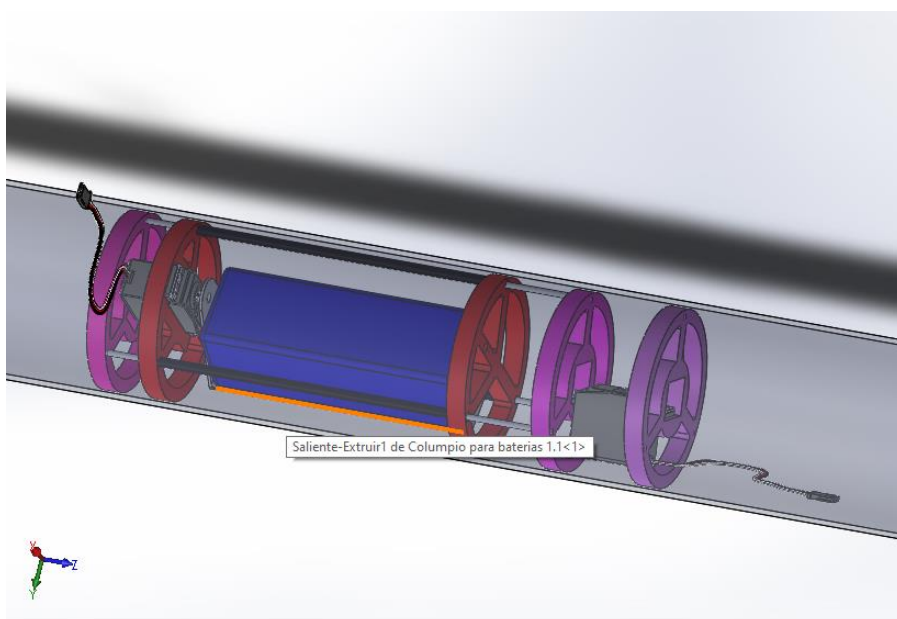


Ilustración 53 Primer módulo diseñado virtualmente de virada e inclinación del submarino. Fuente Propia.

4.2.8 Vista de disposición general de submarino GLIDER.

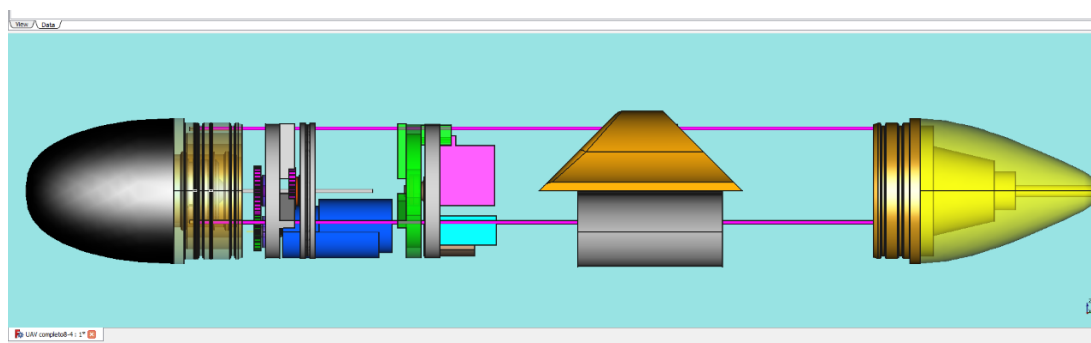


Ilustración 54 Vista general de disposición del submarino. Fuente Propia.

4.3 Planos de las piezas del submarino.

En este apartado hemos incluido una colección de planos realizados durante el trabajo, que ayudan al lector a conocer el aspecto de los elementos.

Algunos de los planos están completamente acotados y otros no. Incluso hay planos de piezas en un estado de diseño que no es el que finalmente ha resultado.

Entendernos que, para este estudio técnico, es incluso conveniente (didácticamente) que se vea que ha habido un proceso de iteración y evolución en el desarrollo de AUV.

Realmente los planos no han sido necesarios para la construcción final del AUV objeto de este TFG.

Los detalles concretos de medidas no son esenciales (en este caso) para las personas que lo construyen.

La impresora 3D es una maquina CNC que se alimenta de información en formato numérico. Esa información ha salido de un modelo CAD consistente y ha pasado a la maquina sin necesidad de una interpretación humana intermedia.

Por eso hemos preferido ilustrar la mayor parte del trabajo con fotos y con imágenes en perspectiva, brindadas por el programa de CAD, que son más fáciles de interpretar para el lector

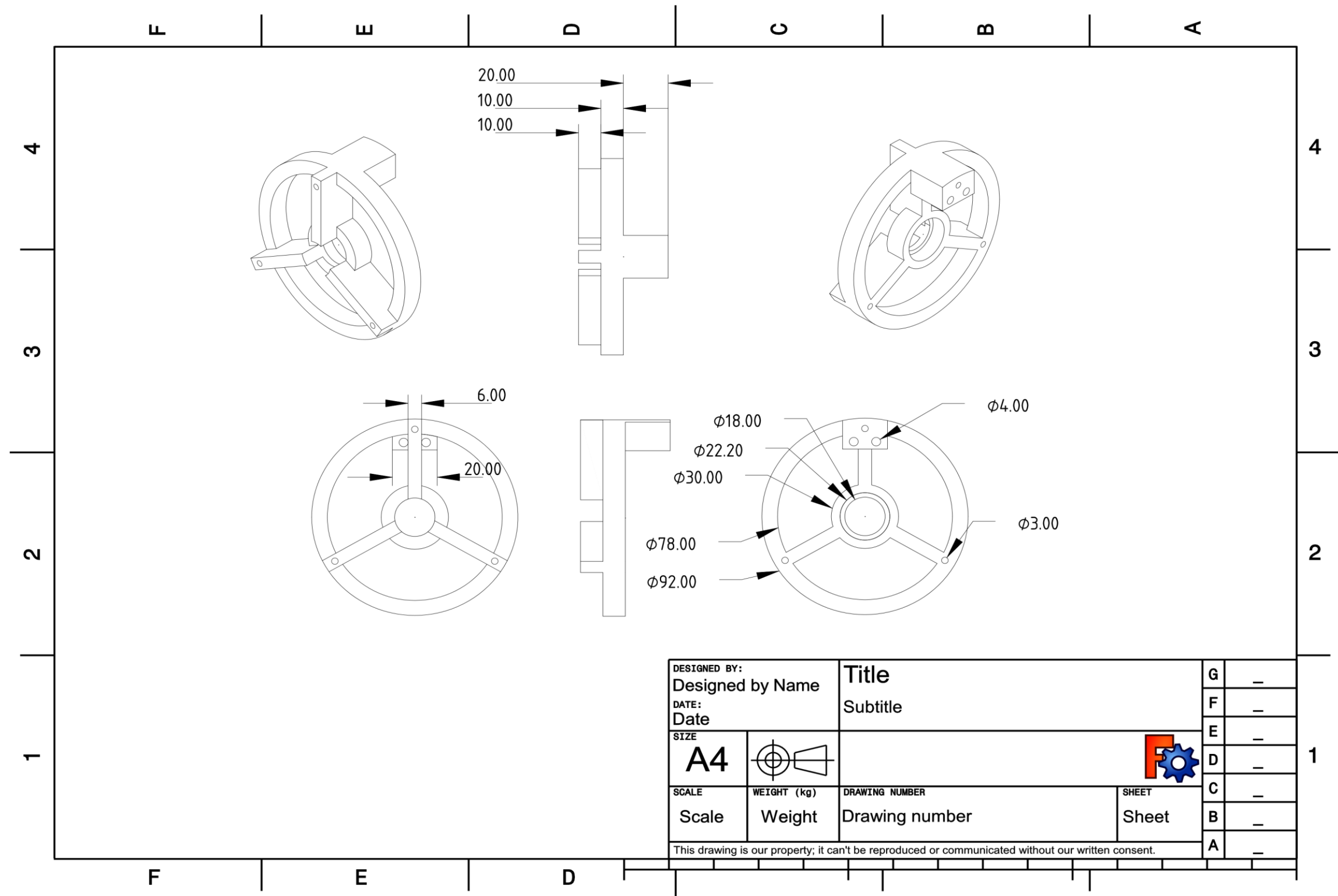


Ilustración 55 Soporte motor inundación 1 Fuente Propia.

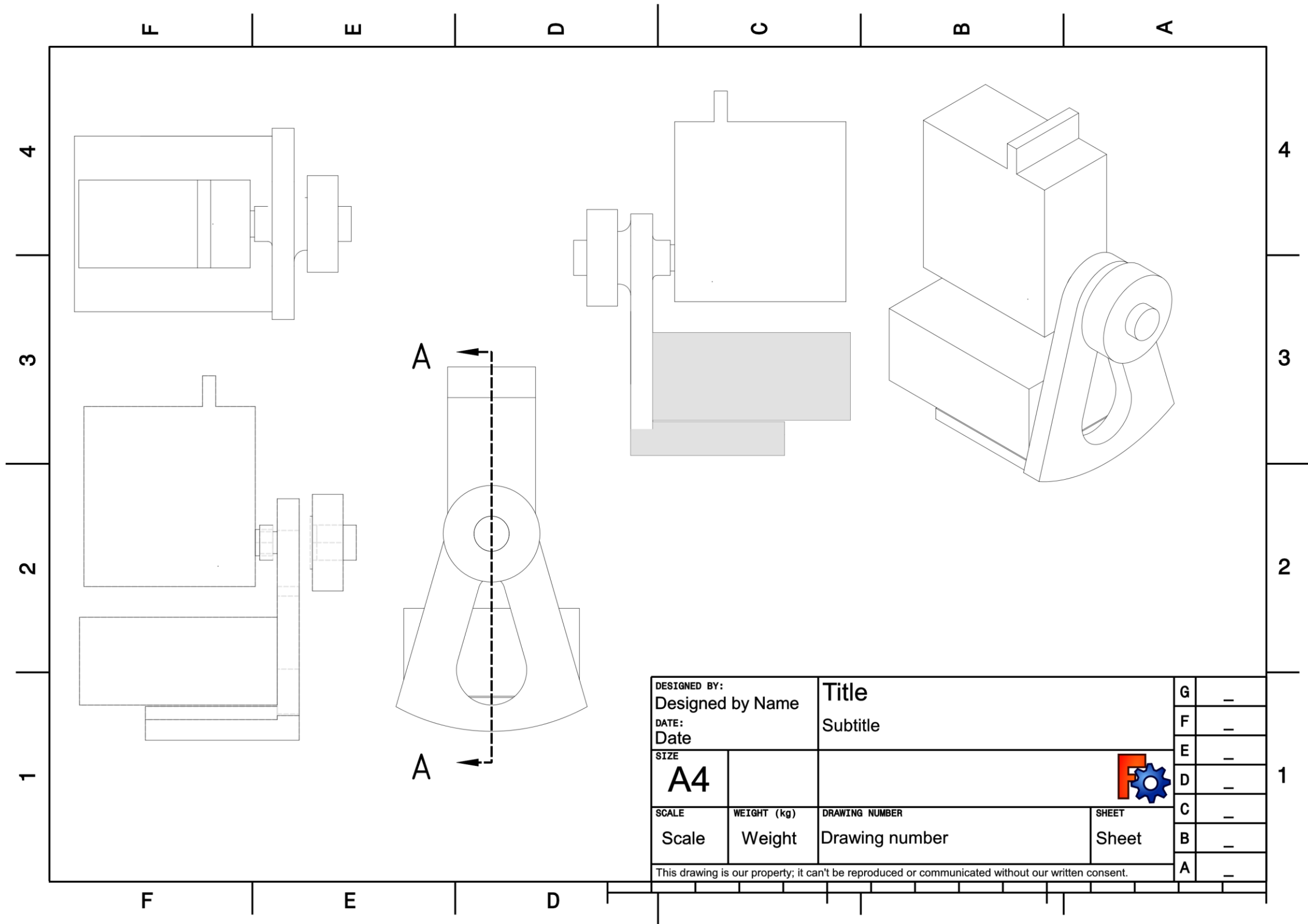


Ilustración 56 Modulo de virada 1 Fuente Propia.

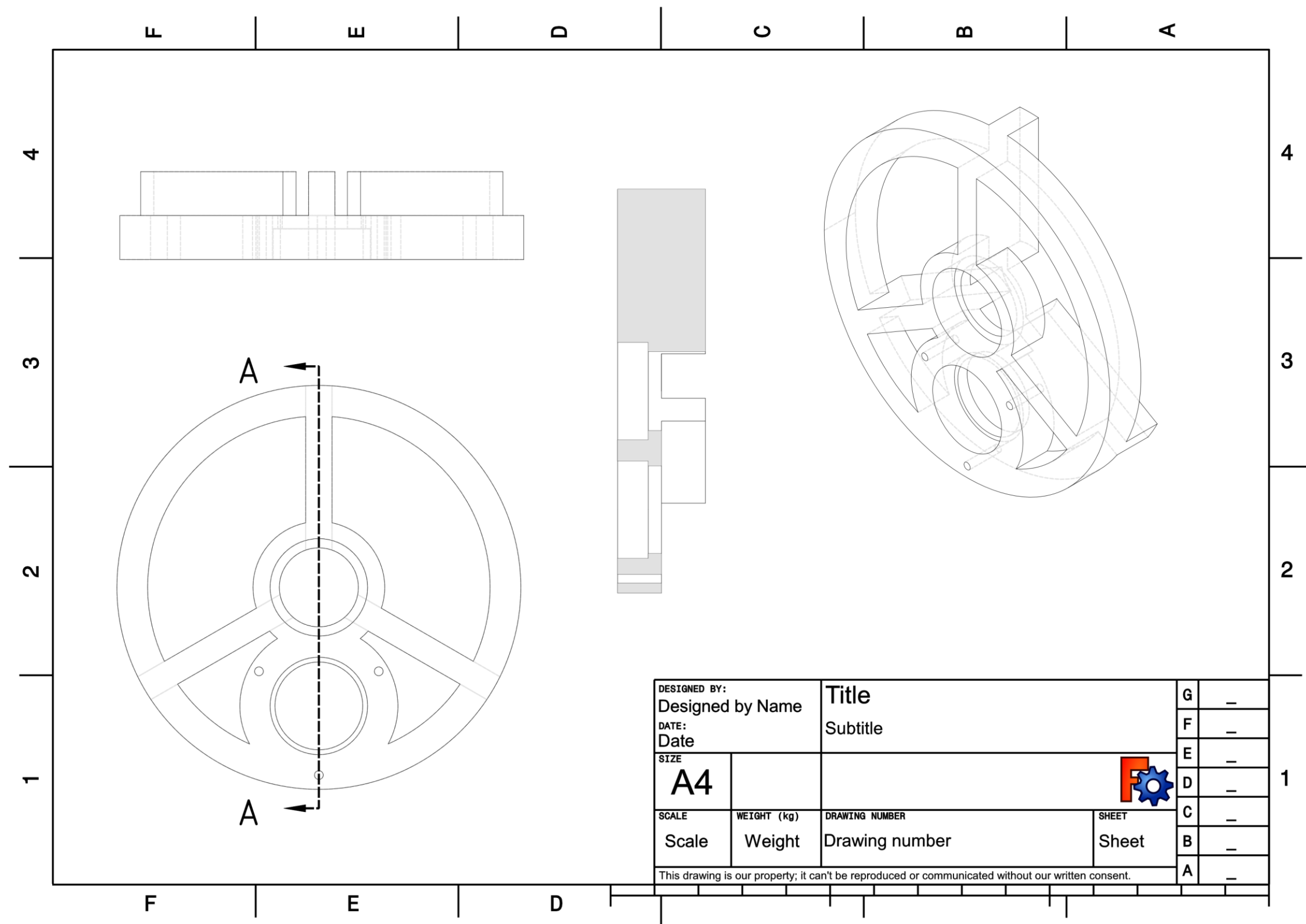


Ilustración 57 Soporte motor inundación 2 Fuente Propia.

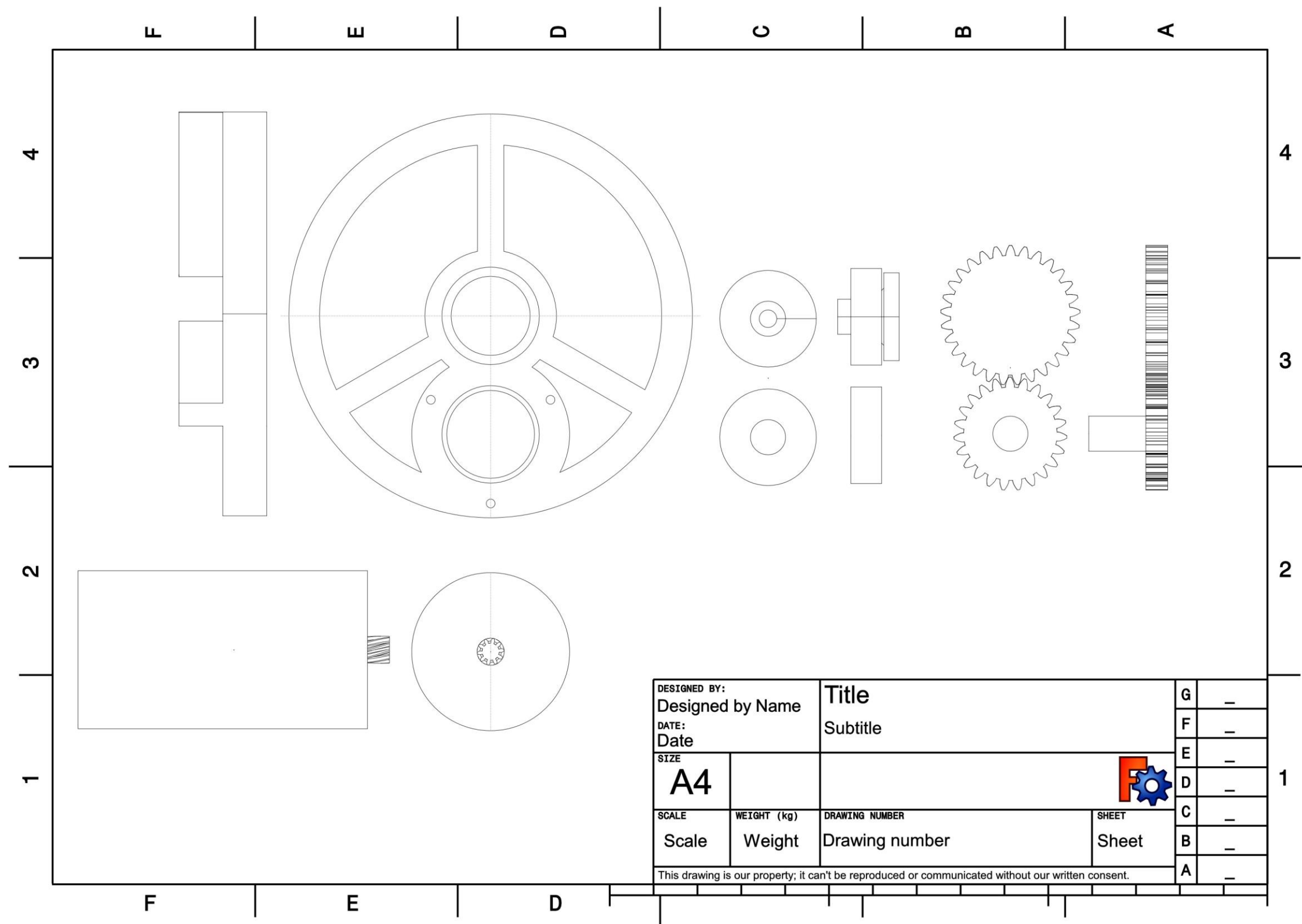


Ilustración 58 Soporte motor inundación 3 Engranajes Fuente Propia.

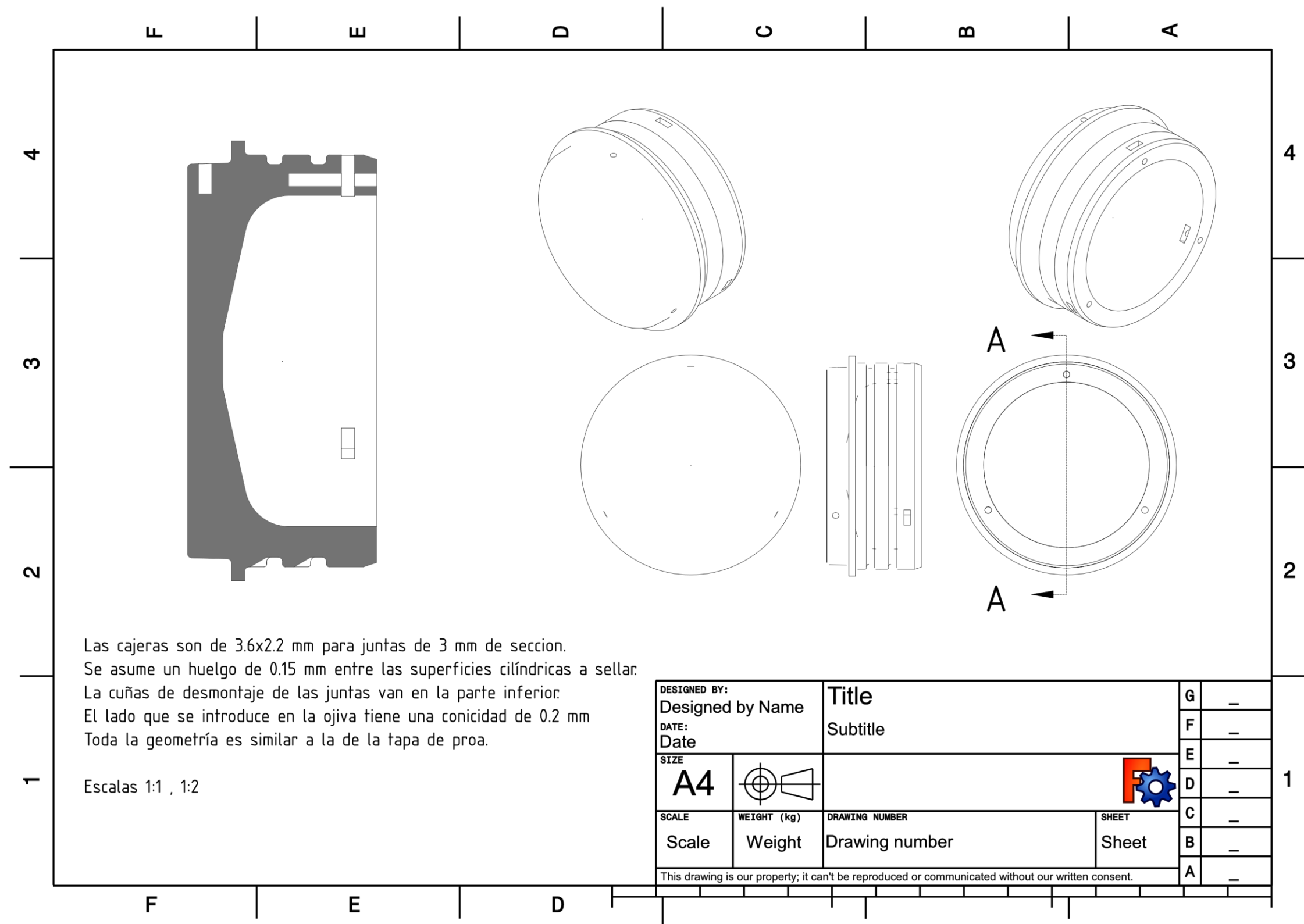


Ilustración 59 Tapa de popa Fuente Propia.

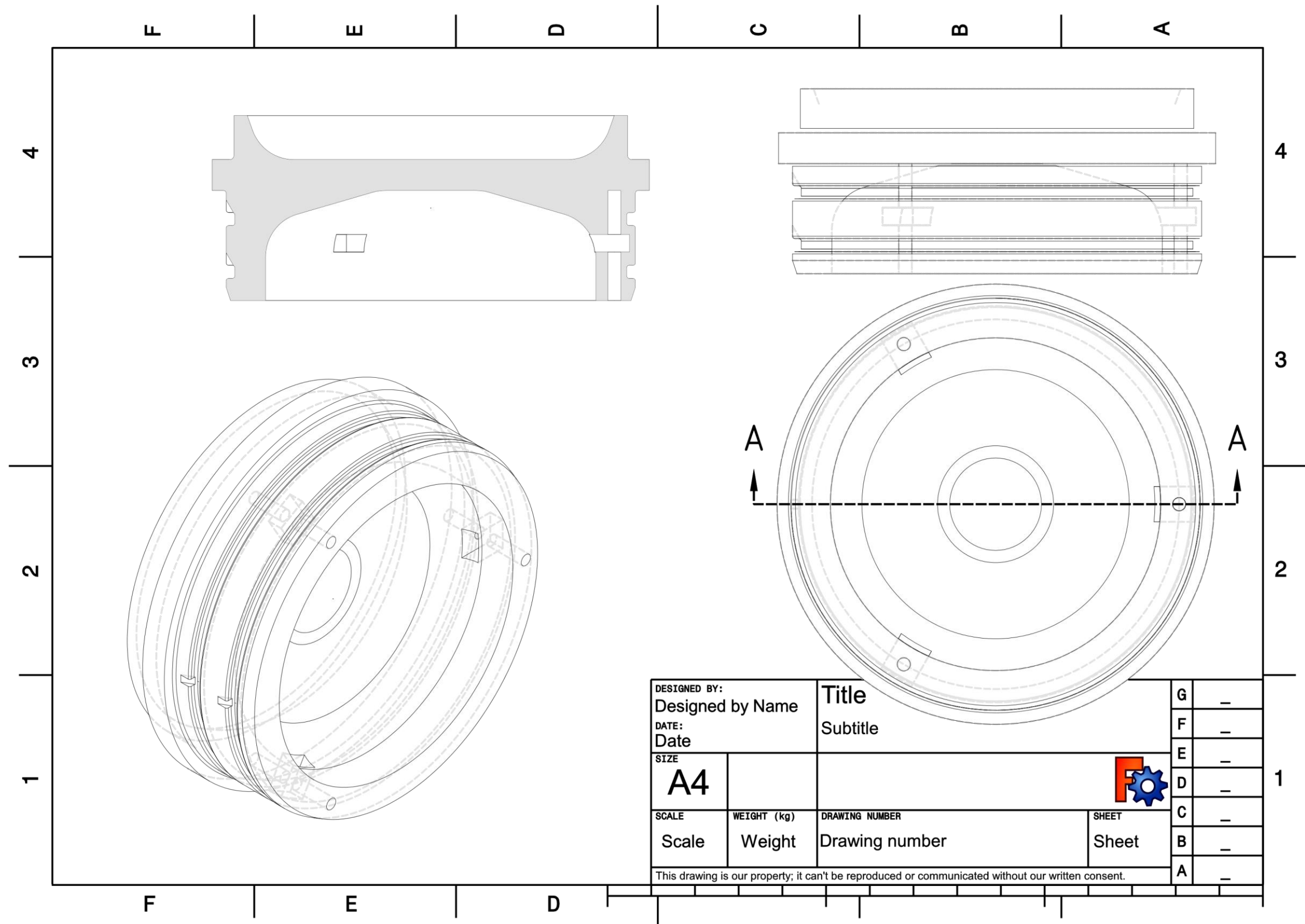


Ilustración 60 Tapa de popa modificada sensor presión .Fuente Propia.

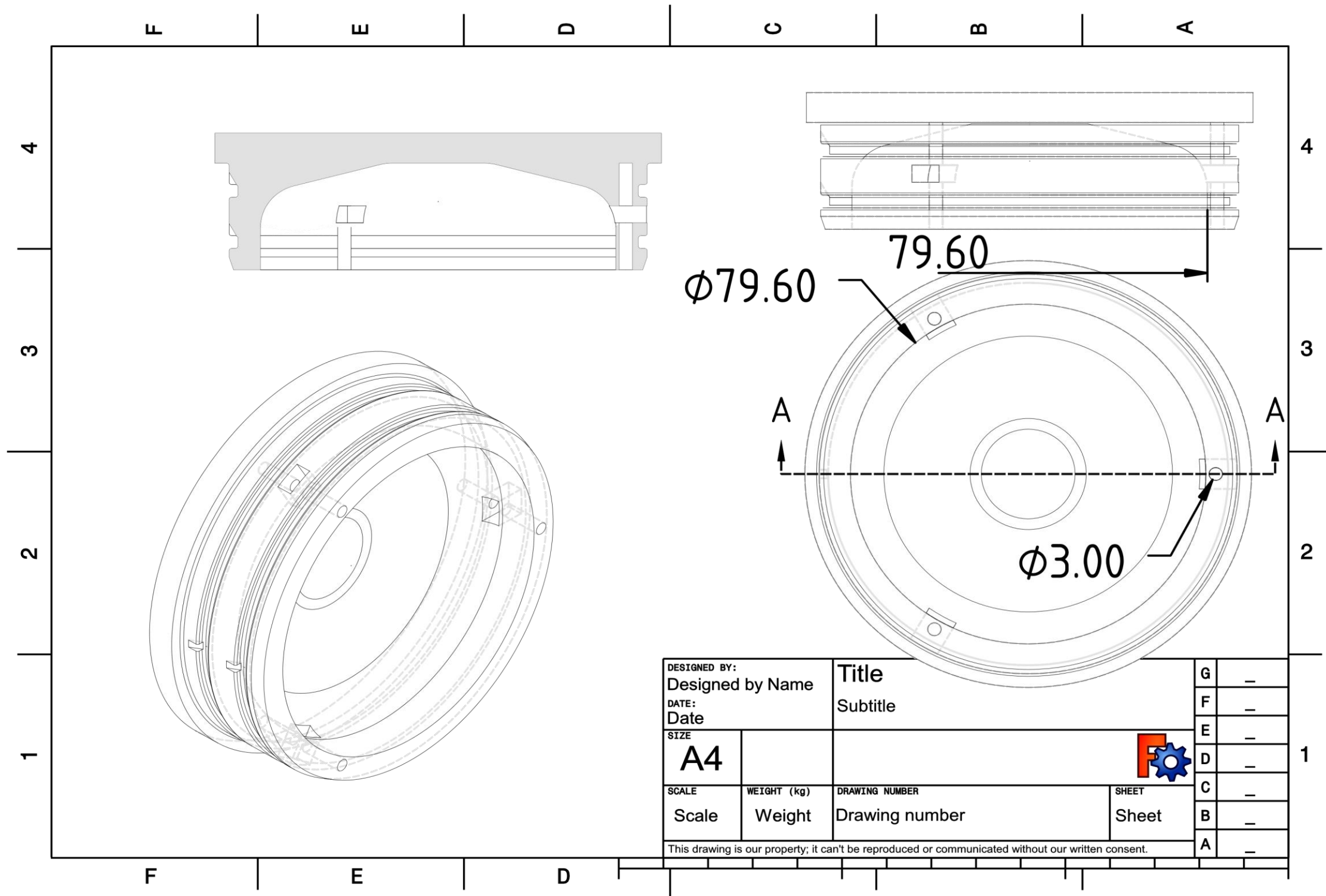


Ilustración 61 Tapa de popa modelo descartado 1 Fuente Propia.

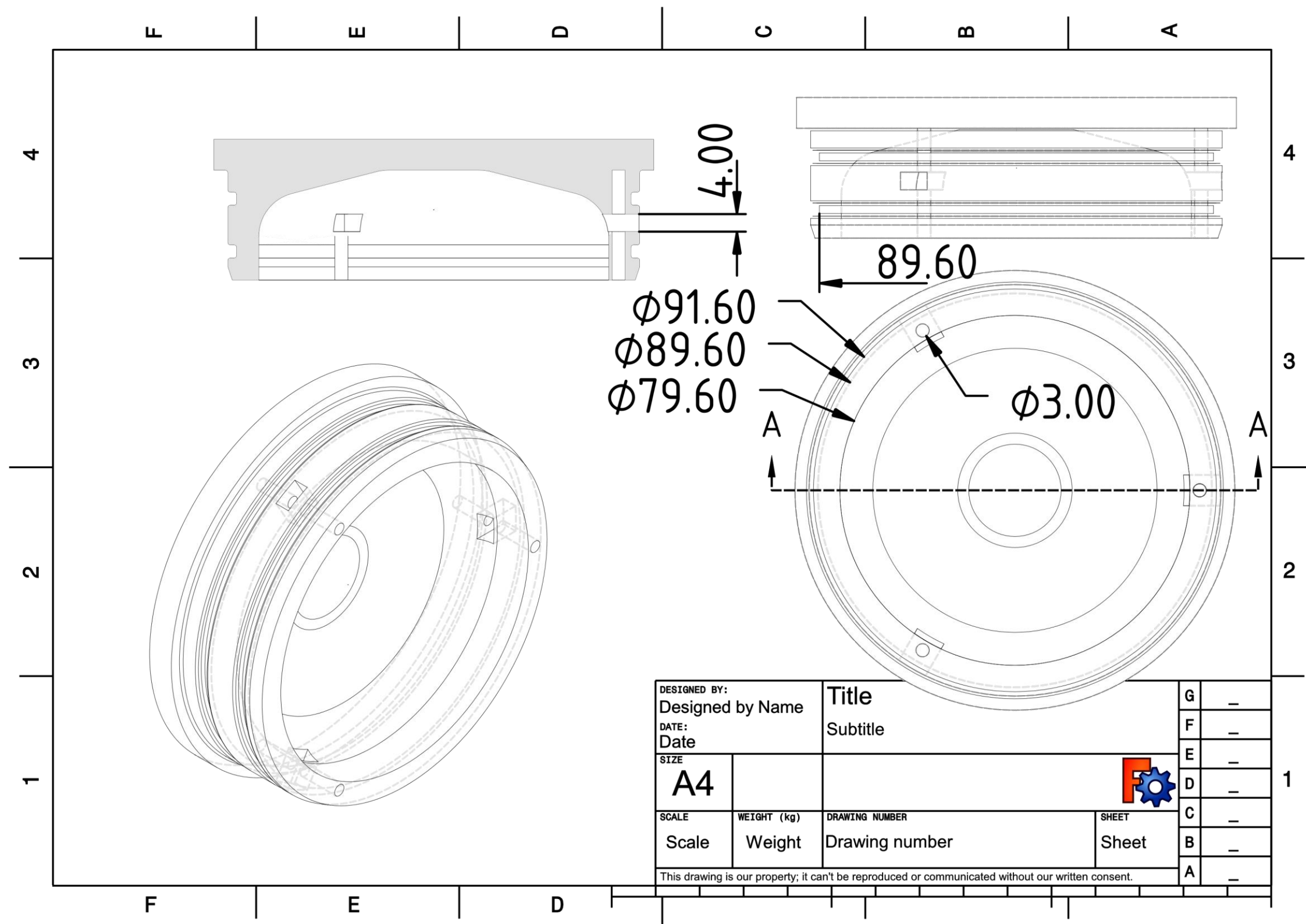


Ilustración 62 Tapa de popa modelo descartado 2 Fuente Propia.

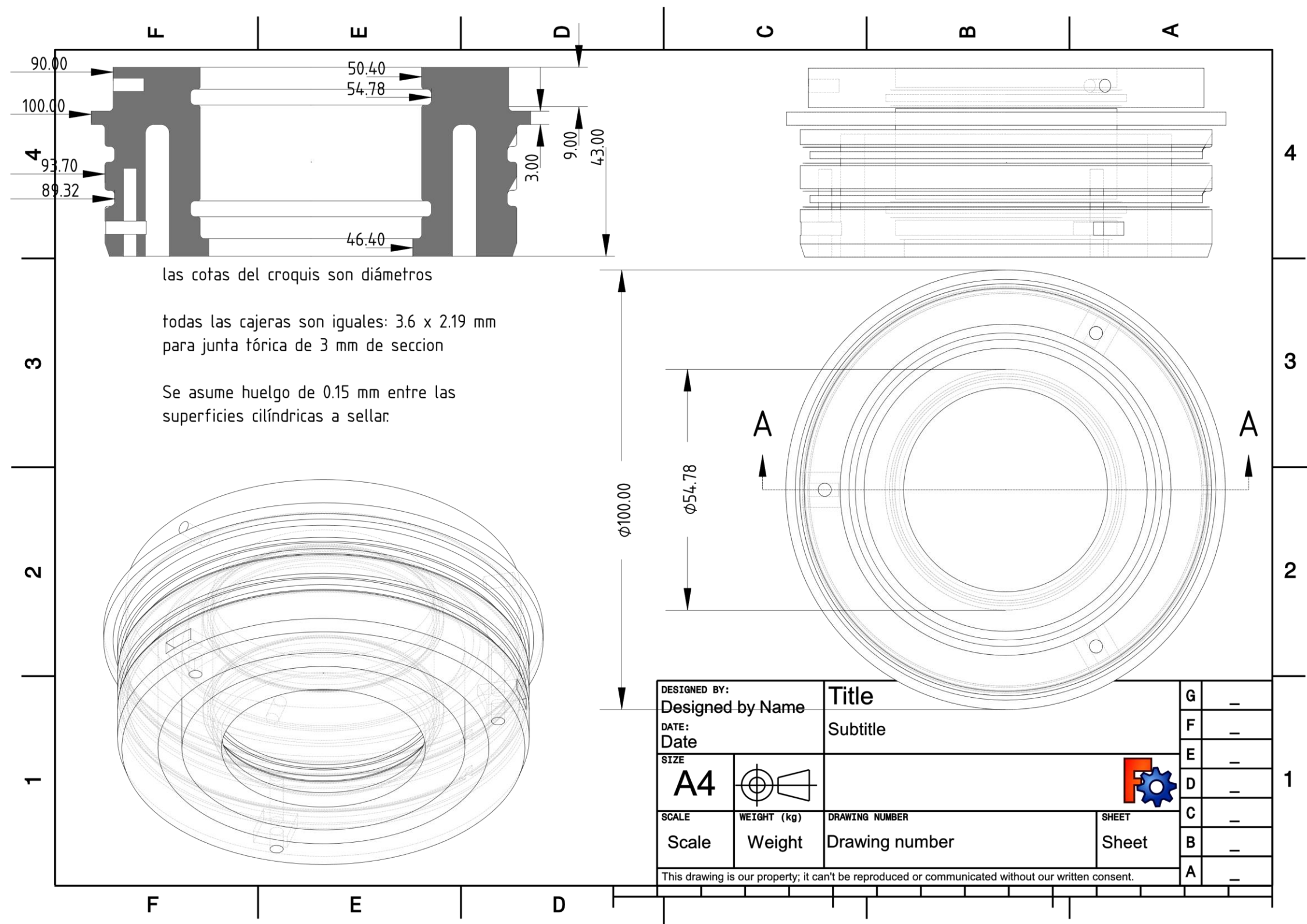


Ilustración 63 Tapa de proa Fuente Propia.

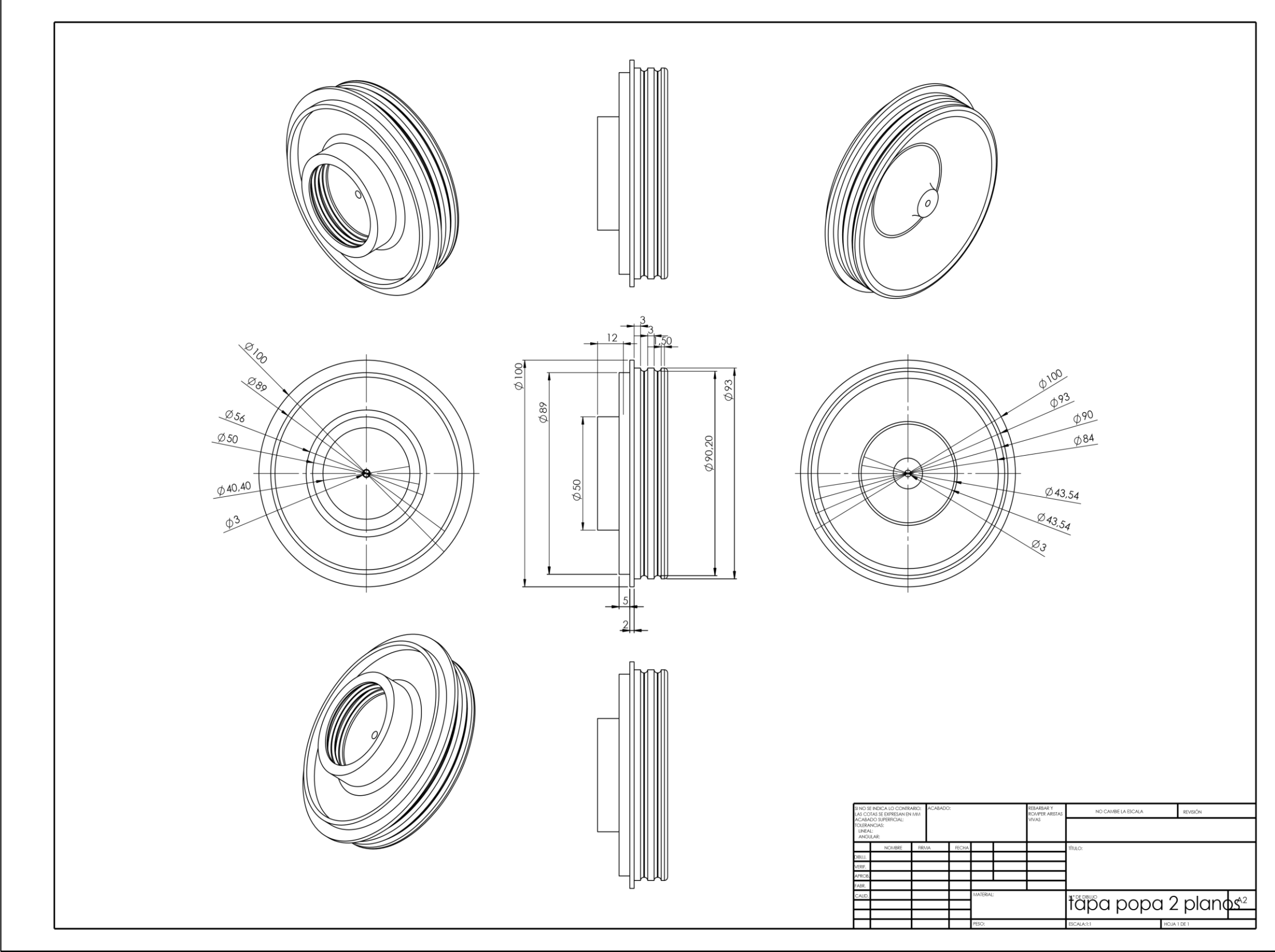


Ilustración 64 Tapa de proa modelo descartado Fuente Propia.

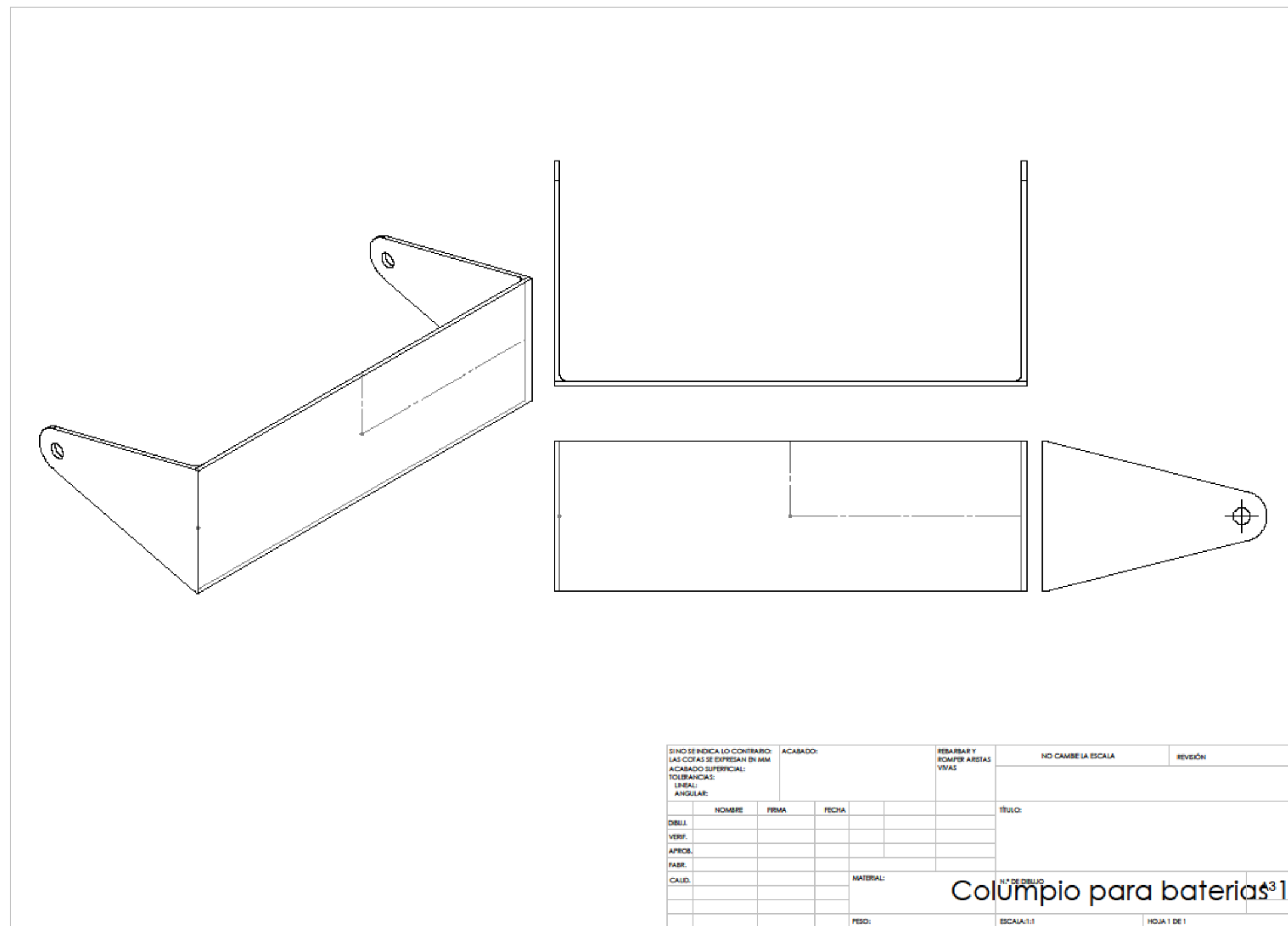


Ilustración 66 Columpio para batería Fuente Propia.

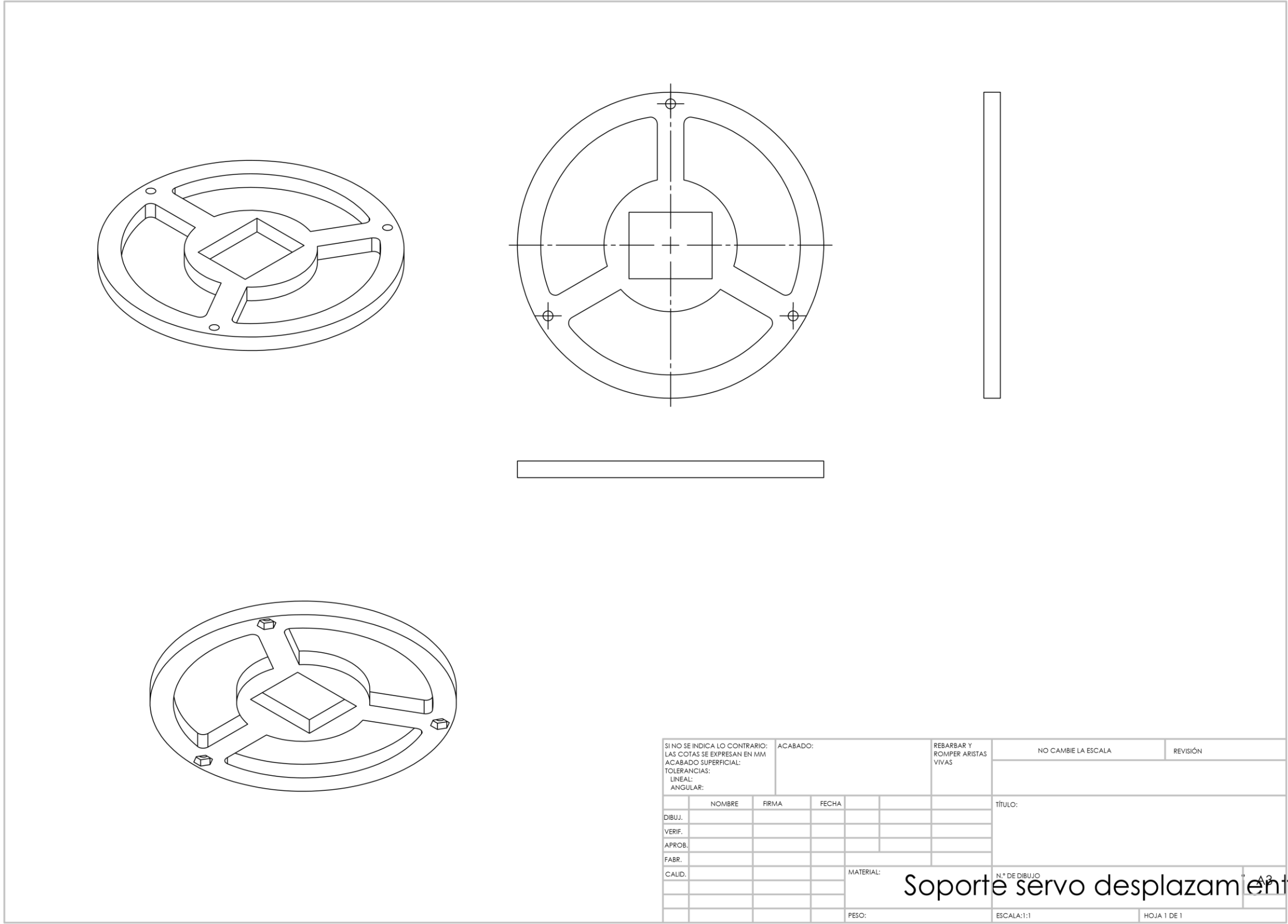


Ilustración 67 Soporte servo desplazamiento Fuente Propia.

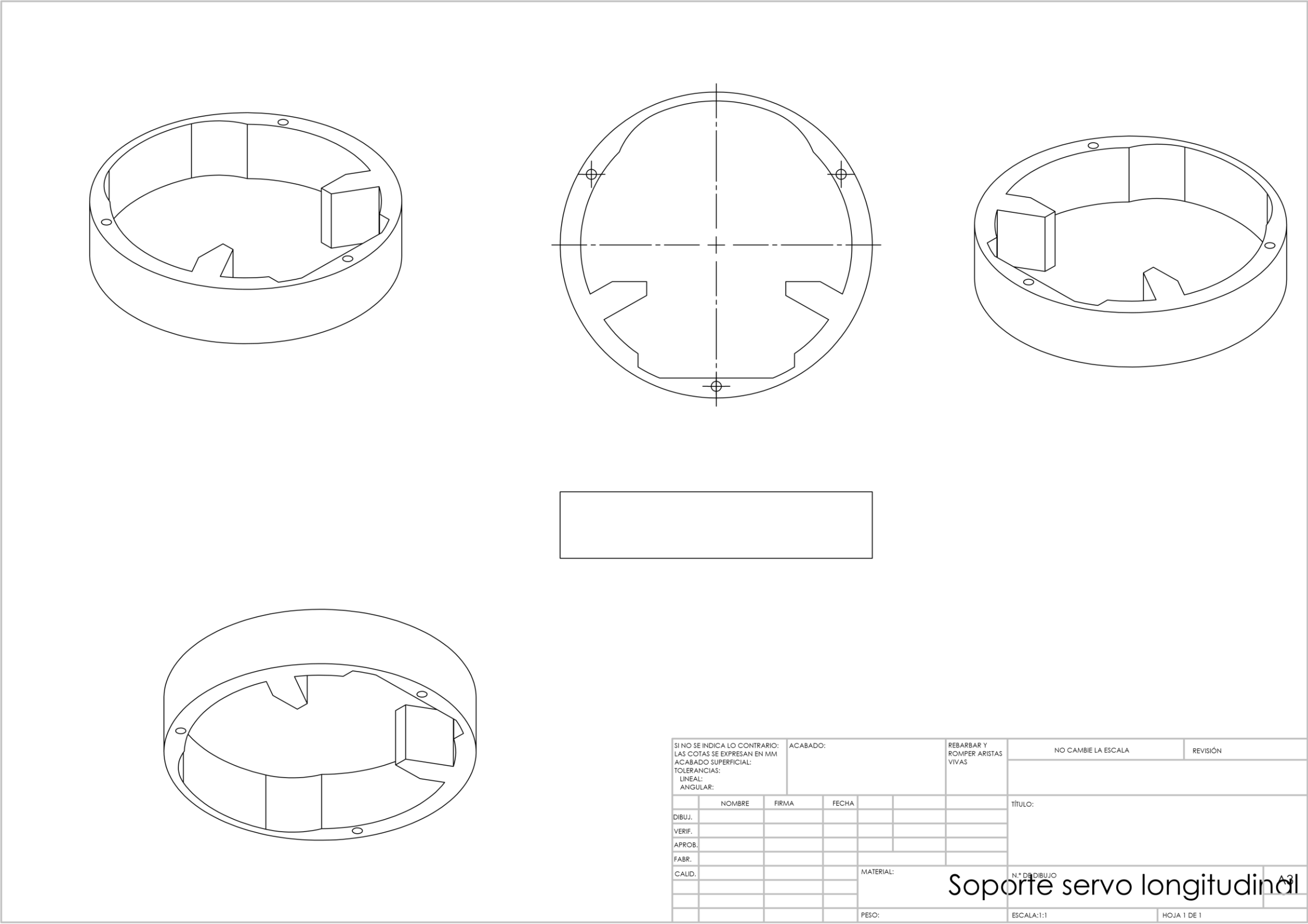
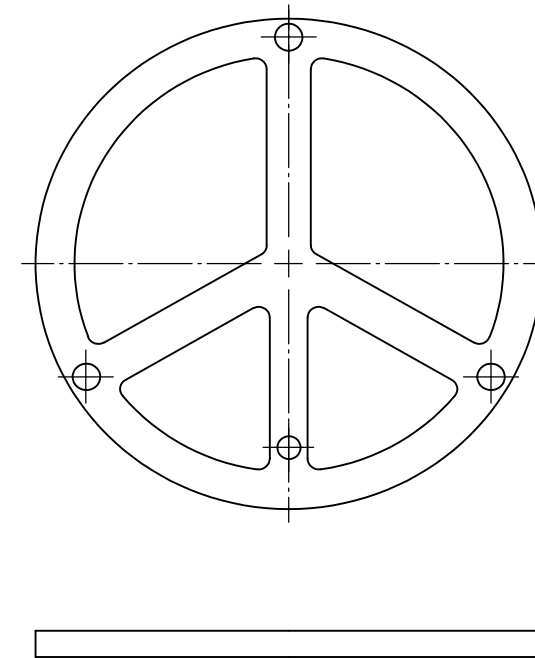


Ilustración 68 Soporte servo longitudinal para inmersión Fuente Propia.



SI NO SE INDICA ACABADO		REFRABAR Y		NO CAMBIA		REVISIÓN	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ROMPER ARISTAS					
ACABADO		VIVA					
TOLERANCIAS							
	NOMBRE	FIRM	FECH		TÍTULO		
DISEÑO							
VERIFICADO							
APROBADO							
ELABORADO							
CALIFICADO							
				MATERIAL	N.º	DE	
					ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	
				PESO:			

Soporte servo virada no servo

Ilustración 69 Soporte para carro de virada móvil Fuente Propia.

5. Bibliografía

5.1 Referencias de Libros.

Doenhoff, I. H. (1958). *Theory of wing section*. New York: Dover Publications, ING.

Mises, R. V. (1959). *Teoría del vuelo*. New York.: Dover publications, Inv.

5.2 Otras referencias de la web, red Internet

1. Sobre teoría de perfiles aerodinámicos, algunos textos clásicos de referencia.

A. **Abbot, theory of wing sections**, un documento Clásico en todas las referencias a publicaciones técnicas de aerodinámica. Edición original agotada, pero actualmente accesible en la web. Contiene elementos de la teoría de las secciones de ala de avión, y aerodinámica. El enlace al libro original puede encontrarse en

<https://aeroknowledge77.files.wordpress.com/2011/09/58986488-theory-of-wing-sections-including-a-summary-of-airfoil-data.pdf> . 20-08-2020

B. Una descripción de perfiles NACA y sus familias, del mismo autor

Abbot,

<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930090976.pdf> 20-08-2020

C. Documento que hace referencia a modelos numéricos genéricos, concreta cálculos en el GLIDER SLOCUM, una referencia en el sector.

https://www.researchgate.net/publication/228580445_Underwater_GLIDER_model_parameter_identification 20-08-2020

2. Más sobre teoría de vuelo,

A. Mecánica del vuelo

http://airspot.ru/book/file/73/hull_airplane_flight_mechanics.pdf

20-08-2020

B. Un manual muy visual y claro sobre teoría de vuelo. Las imágenes y texto son excelentes. Uno de sus capítulos.

https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/GLIDER_handbook/media/gfh_ch03.pdf

20-08-2020

C. Se ha encontrado un proyecto OPEN SOURCE que es coincidente con mis expectativas sobre lo que yo deseo como un TFG. Recoge ideas, fotos, experiencias, y deja espacio para mis propuestas de innovaciones.

[https://hackaday.io/project/20458-open-source-underwater-](https://hackaday.io/project/20458-open-source-underwater-GLIDER)

[GLIDER](https://hackaday.io/project/20458-open-source-underwater-GLIDER) 20-08-2020

D. (**VACAS**). design and testing of a pneumatically propelled underwater glider for shallow wáter (2015).

http://www.unmanned.vt.edu/discovery/reports/VaCAS_2015_01.pdf

20-08-2020

E. Underwater Glider Model Parameter Identification. (2003) By Graver, Bachmayer and Leonard. Esta es la fuente de nuestros coeficientes hidrodinámicos, aunque con correcciones. También hace referencia a como se estableció el modelo del **SLOCUM**.

[https://www.researchgate.net/publication/228580445_Underwat](https://www.researchgate.net/publication/228580445_Underwater_glider_model_parameter_identification)

[er_glider_model_parameter_identification](https://www.researchgate.net/publication/228580445_Underwat) 20-08-2020

F. AUTONOMOUS **BUOYANCY-DRIVEN** UNDERWATER GLIDERS. Cabe un comentario similar al anterior

http://www.ifremer.fr/lpo/gliders/donnees_tt/references/techno/4

[Gliders.pdf](#) 20-08-2020

3. Juntas tóricas, páginas web.

- A. https://www.parker.com/literature/ORD_5700_Parker_O-Ring_Handbook.pdf 20-08-2020
- B. <https://eriks.nl/documentatie/o-ringen/o-ringen-en-overige-ringen/eriks-o-ring-technical-handbook.pdf> 20-08-2020
- C. <https://www.applerubber.com/src/pdf/seal-design-guide.pdf> 20-08-2020
- D. https://www.tss.trelleborg.com/-/media/tss-media-repository/tss_website/pdf-and-other-literature/catalogs/o_ring_gb_en.pdf?revision=b4d95e28-42c5-4c69-b1fa-370ea71fc5ce 20-08-2020
- E. Programa para claculo de juntas toricas de forma online, (muy práctico). <http://www.applerubber.com/oring-gland-calculator/#medium-search-field> 20-08-2020

4. Reglamento de clasificacion de sumergibles ABS. ABS Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities, 2016

https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/special_service/7_Underwater_Vehicles_Hyperbaric_Facilities_2016/UWVS_Rules_e.pdf 20-08-2020

5. ABS reglamento de clasificación de buques de acero, ABS Steel Vessels rules 2016. Systems and Machinery

https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/conventional_ocean_service/Steel_Vessel_Rules_ABS_2016/SVR_Part_4_e-July16.pdf 20-08-2020

6. Coulson & Richardson's CHEMICAL ENGINEERING design, VOLUME 6, 4ed

<http://dl4a.org/uploads/pdf/Coulson%20Richardson's%20Chemical%20Engineering%20Vol.6%20Chemical%20Engineering%20Design%204th%20Edition.pdf> 20-08-2020

6. ANEXOS.

6.1 Como se ha configurado este TFG.

6.1.1 Sobre la ‘espiral del proyecto’ y la memoria.

No obstante haber intentado tener las ideas muy aclaradas desde el principio, hemos sufrido mucho al redactar la memoria, a la vez que perfeccionábamos el diseño. La razón es que avanzar en la descripción de algunas partes o sistemas, está condicionando otros, que a priori, creíamos que no eran problemáticos.

Al principio, hemos intentado redactar la memoria. Como si fuera una foto fija, un producto terminado. Pero al detallar partes vemos cómo interactúan con el resto y en ocasiones nos vemos obligados a modificar el diseño. La memoria se convierte en una evolución de pensamiento que va redibujando un producto cambiante.

Pese a que, en algún momento, ya habíamos terminado la fase de diseño conceptual, avanzábamos en la de diseño preliminar, y en algunas materias estamos en el diseño de detalle o constructivo, seguíamos buscando referencias en la Web. (Esto tiene que ver con el proceso iterativo y cíclico de la actividad de diseño). Así seguimos encontrando fuentes de información muy interesantes, relacionadas con la materia de los AUV, y en particular de los GLIDER.

Por el camino quedan intentos, reflexiones, correcciones y evolución. La memoria recoge todo ello, y nos lo hace entender de manera racional. Todo ello es lo ‘natural’ en cualquier proyecto técnico, como suele describirse en la teoría del diseño.

La redacción, dadas estas circunstancias, ha sido lo más difícil de este TFG. Mantener un texto inteligible que pueda ser leído de manera lineal, aunque describa un viaje cíclico e iterativo, ha sido una tarea que ha requerido mucho esfuerzo de rigor. Incluso el orden escogido para el índice ha sido fruto de multitud de variaciones mientras se iba realizando el proyecto. Curiosamente ha sido mucho más gratificante buscar y encontrar las soluciones técnicas del AUV que hacer legible la memoria.

A las 40 h de edición de la memoria ya tenemos una estructura narrativa depurada. Diseño conceptual y anteproyecto están superados, y estamos en fase de diseño constructivo o detalle. Todavía queda trabajo de concretar, embellecer y perfeccionar y hacer más consistentes los contenidos de los ANEXOS. Podemos estimar que el tiempo trabajado en las otras labores distintas de la edición de la memoria es otro 200% adicional. El tiempo total equivalente de trabajo en este instante es del orden de 300% de 40 h = 120h.

Algunas de las tareas más gratificantes han sido visualizar en el CAD los diversos componentes mientras eran definidos y perfeccionados, en las etapas conceptual y preliminar.

También fue gratificante constatar la funcionalidad final de los modelos numéricos de vuelo, de estabilidad, de estructura, estanqueidad, entre otros.

Otro hito satisfactorio y causa de alivio fue alcanzar una estructura estable y equilibrada en el índice de este TFG.

Por el contrario, depurar los errores en la confección de las hojas de cálculo de los modelos de vuelo, resistencia estructural, etc., fueron labores más ingratas.

Como resultado de todo este proceso, hemos decidido que el índice de este TFG se estructure en 3 bloques sucesivos (aparte de introducción, referencias y anexo): Diseño CONCEPTUAL – Proyecto CONTRACTUAL – Proyecto CONSTRUCTIVO. También debe entenderse que ninguno de los bloques es

un 'proyecto completo', sino unas pinceladas o muestras del trabajo realizado.

6.1.2 Componentes considerados en la síntesis proyectiva.

Hemos intentado sintetizar, es decir, utilizar elementos existentes, conceptos, documentos, formulaciones, soluciones, proyectos afines, etc, que faciliten nuestro trabajo. Para evitar redundancias, aquí solo enunciamos la temática, dejando las referencias más detallada en el apartado de bibliografía. Entre los componentes-estudios que hemos considerado, destacamos los relacionados con las siguientes temáticas:

1. Modelos de sumergibles de investigación de pequeño tamaño, no tripulados. Casos reales.
2. Las juntas tóricas o toroidales como elementos de estanqueidad de uso universal.
3. La estructura resistente de recipientes sometidos a presión exterior.
4. Nociones de teoría de vuelo, aerodinámica, perfiles sustentadores y planeadores,
5. Electromecánica básica para robótica doméstica.

6.2 Facetas específicas de la ingeniería marítima analizadas en este TFG.

Como habíamos anunciado, hemos dedicado especial atención a ciertas facetas propias de la especialidad académica a la que se dirige este TFG:

- 1- Estanqueidad.
- 2- Resistencia estructural.
- 3- Flotabilidad, estabilidad, propulsión y gobierno.
- 4- Disposición de los mecanismos.

A continuación, describimos en detalle como las hemos tratado:

6.2.1 Estanqueidad.

<https://hackaday.io/project/20458-open-source-underwater-GLIDER/log/61097-waterproofing-problems>



Ilustración 71 Tapas comerciales para estanqueidad. Fuente hackday.

La estanqueidad que hemos analizado es la de los huecos de las zonas de contacto entre distintos elementos del AUV que deben ser estancas. Partimos de la base de que cada uno de los elementos, por sí mismo, es estanco por su material y construcción. De modo que las zonas a estudiar en esta materia han sido:

1. Las juntas de unión entre el cilindro resistente, y sus tapas de cierre extremas de proa y popa,
2. las juntas de separación entre el émbolo de control de flotabilidad y el cilindro dentro del que discurre,
3. y por último, las juntas de unión entre la tapa de cierre de proa del cilindro resistente y el cilindro de flotabilidad que la atraviesa.

Todas esas uniones las hemos estudiado y resuelto con una solución única: la junta universal de tipo toroidal (juntas tóricas), por su eficacia y simplicidad. Hemos analizado sus limitaciones y condicionantes, así como sus virtudes, y finalmente se han diseñado, estableciendo el material, elastómero, para su

compatibilidad con los materiales y fluidos en contacto, los parámetros de apriete, etc, para finalmente determinar las dimensiones de las juntas tóricas, sus cajas, y el juego entre las piezas a unir con estanqueidad.

Hemos revisado las instrucciones de algunos fabricantes de juntas (ver ref), donde nos indican como se diseñan y dimensionan.

Veamos como lo aplicamos a cada caso citados previamente:

- Ilustraciones del manual.
- Ilustración de nuestras geometrías.
- Cálculos.
- Resumen de resultados.

Del mismo modo para los casos 2 y 3.

6.2.1.1 Detalles de la estanqueidad.

El AUV debe ser estanco en sus condiciones operativas, pero también debe ofrecer fácil acceso a su interior para mantenimiento. Durante la operativa, existen piezas que tienen movimiento relativo entre sí, y han de mantener además estanqueidad entre ellas (es el caso de la cámara de flotabilidad de volumen variable, con un émbolo móvil en su interior). La estanqueidad en todos esos casos es un problema crucial.

Curiosamente, el promotor del AUV OPENSOURCE asume que la estanqueidad es un problema que le supera, y prefiere comprar una solución comercial, antes que desarrollar él mismo tal solución.

<https://hackaday.io/project/20458-open-source-underwater-GLIDER/log/61097-waterproofing-problems>

Nosotros podemos intentar hacer frente a ese desafío. Nos anima a ello 2 razones claras:

1. Disponemos de una capacidad de mecanizado de cierta precisión a bajo coste, capaz de replicar nuestros diseños CAD. Se trata de una impresora 3D doméstica.
2. Tenemos la formación técnica suficiente para acometer ese reto, y en este TFG queremos dejar constancia de ello.

Después de documentarnos convenientemente, y meditar sobre el diseño, hemos llegado (curiosamente) a una solución muy similar (sin haberlo previsto inicialmente) que la comercial de la referencia citada. Sin embargo, nosotros hemos estudiado y decidido por nuestra cuenta, con espíritu crítico y contrastado, cada uno de los detalles de nuestro diseño.

En este anexo de estudio de la estanqueidad, junta del cilindro, se calcula y justifica.

En la memoria (resumiendo) solo se muestra la imagen y las cifras.

6.2.1.2 Cálculo de las juntas estancas: proa popa y embolo.

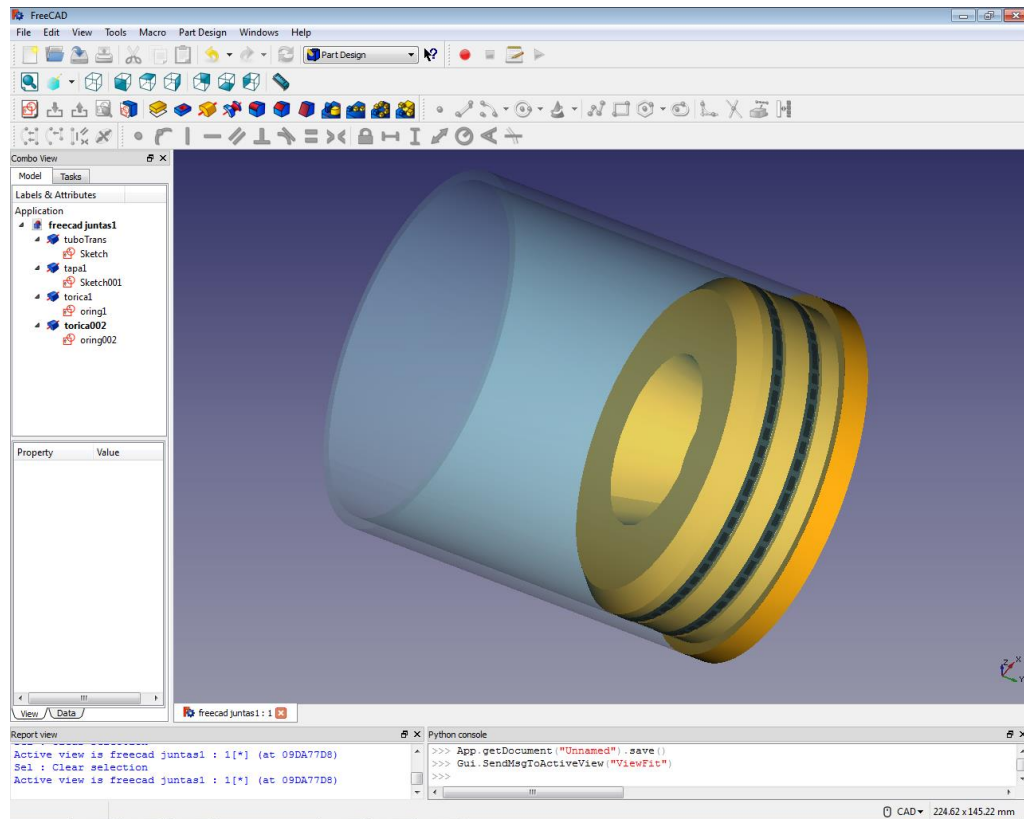


Ilustración 72 Tapa proa con cilindro de inundación. Fuente Propia.

Nuestras intenciones:

1. máxima simplicidad, economizar los materiales usados, y el tiempo de mecanizado o preparación.
2. Evitaremos alterar la superficie lateral del cilindro, y asumimos que el acceso al interior debe hacerse a través de tapas desmontables situadas en los 2 extremos del cilindro.
3. Si podemos usar el propio cilindro como uno de los elementos de sello de la junta, lo haremos. Eso requiere que la superficie tenga el acabado superficial, rugosidad y geometría suficientemente uniforme. Asumimos que el tubo de metacrilato (MC) previsto si cumple esas condiciones, incluido radio de curvatura uniforme, etc. La alternativa (que no aplicaremos en este caso) sería que la tapa

sellara contra un marco, y ese marco fuese unido de manera permanente al cilindro (con adhesivos selladores permanentes).

4. El sello principal lo constituye la zona de contacto (aproximadamente una corona circular), entre el canto del cilindro y un flanco plano de la tapa. El aumento de la presión debe aumentar la eficacia del sellado. Esta junta está sometida a una gran fuerza de compresión, creciente con la presión, cuyo valor puede calcularse por el producto del área de la tapa y la presión exterior, (a 10 m de profundidad: $1 \text{ kg/cm}^2 \times 75 \text{ cm}^2 = 75 \text{ kg}$). Si la huella de contacto en la junta asumimos que es una pista (corona circular) de 1 mm de ancho, y unos 100 mm de diámetro, el esfuerzo de compresión sería: $\sigma = 75\text{kg}/(3,14 \times 10 \times 0,1) = 25 \text{ kg/cm}^2 = 0,25\text{N/mm}^2$. Varios ciclos de esa carga de compresión podrían agotar las cualidades de una junta tórica de elastómero común. Por ello habría que acudir a un material que soporte mayor esfuerzo de compresión sin deterioro. El material debe cumplir la función de deformarse para adaptarse a la rugosidad superficial de las 2 superficies (a la tapa, por un lado, y al canto del cilindro por otro). En misiones similares, si la compresión es muy grande y se están usando materiales metálicos, se pueden usar juntas de metal blando (arandelas de cobre, etc.). En nuestro caso puede bastar una arandela plana de plástico (polietileno, polipropileno, etc.) delgado (0,2 mm).
5. Usaremos adicionalmente 2 juntas tóricas, (situadas en paralelo, en la parte cilíndrica del tronco de la tapa) como sello secundario, para cortar leves filtraciones de la junta principal (la arandela del canto del cilindro). Las juntas tóricas están diseñadas para trabajar con una leve deformación limitada de manera prevista por las dimensiones de sus cajas, y que la presión hidráulica en uno de sus flancos libres deforme levemente el toroide, ajustándolo más a la leve rugosidad superficial. Usamos 2 tóricas por 2 razones: seguridad redundante, y limitar el mínimo juego angular que pueda

existir entre el eje del cilindro y el eje de la tapa, que es factible por las diferencias de diámetros entre el interior del cilindro de metacrilato y el exterior del tronco de la tapa. El minimizar el juego entre cilindro y tapa facilitará el trabajo de la junta del canto del cilindro, y de las 2 tóricas, en su labor de estancar.

6. Con todo lo dicho parece difícil encontrar un tipo de tapa más perfecta que la que hemos propuesto.

Un croquis con el detalle del diseño es el siguiente corte por un plano meridiano de la tapa. Solo se representa el corte a un lado del eje de simetría cilíndrica de la tapa. Ese eje de simetría se ve a la derecha de la imagen, en vertical:

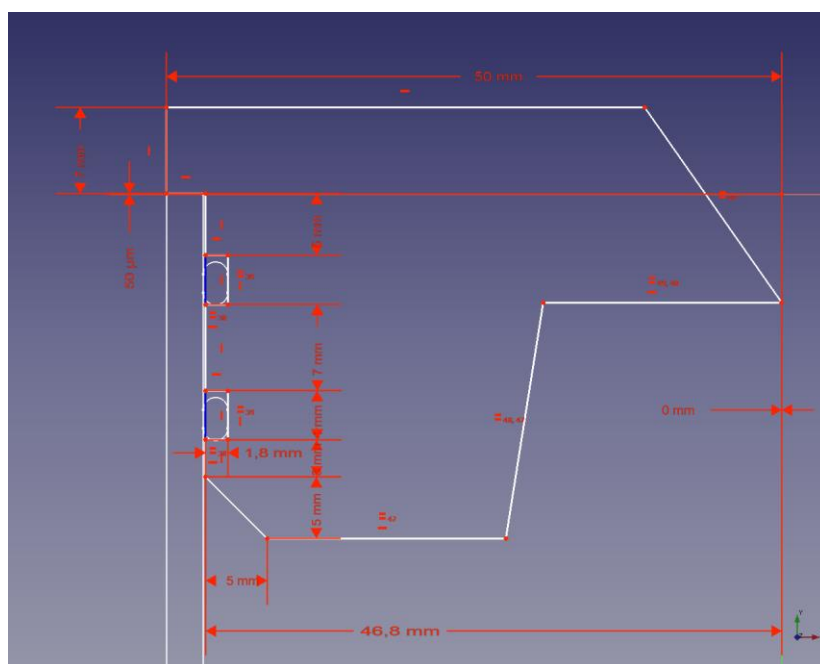


Ilustración 73 Plano de Cajera para hacer simetría circular. Fuente Propia.

La cajera ampliada, con detalle de la junta tórica. Se aprecia su geometría inicial (sin comprimir), y después de montada (in situ, comprimida):

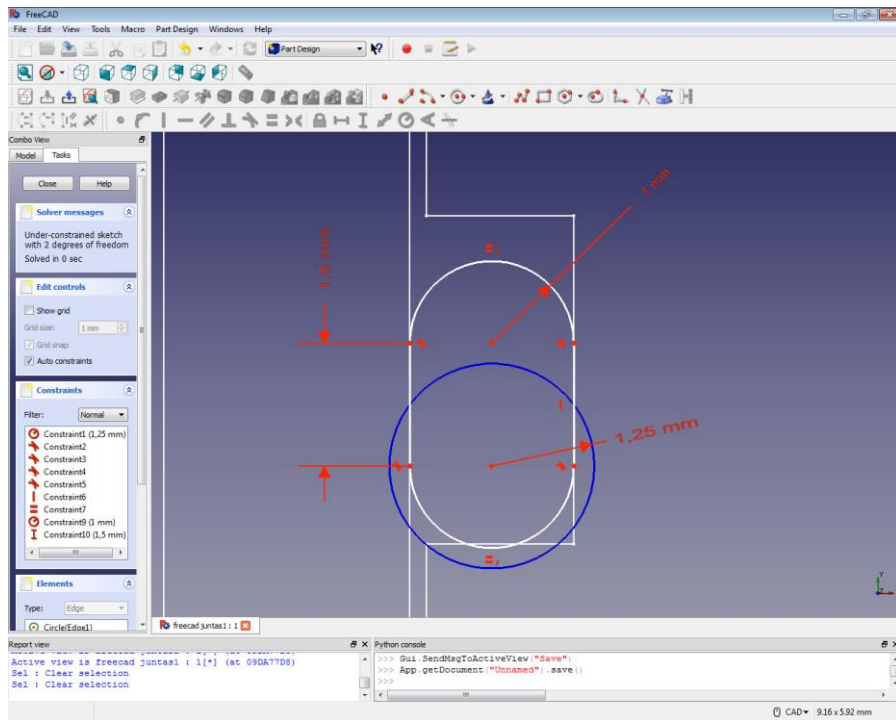


Ilustración 74 Junta tórica Fuente Propia.

La eficacia de la junta es muy sensible a las dimensiones de la caja y los huelgos entre los elementos. Las dimensiones del dibujo no son las definitivas. Se estiman dimensiones del siguiente orden:

- Juego medio entre las paredes del tronco de la tapa y el cilindro: 0,2 mm.
- Diámetro de la sección del toroide sin deformar: 2,5 mm
- Ratio de 'acomodo' $2,5/0,2 = 12,5$ (debe ser >10 . cuanto mayor menos riesgo de extrusión de la junta a través del huelgo o gap entre las partes a enfrentar)
- Aplastamiento admisible 20% $0,2 * 2,5 = 0,5$ mm
- Dimensión del toroide deformado presionado: $2,5 - 0,5 = 2,0$ mm
- Profundidad de la caja $2,0 - 0,2 = 1,8$ mm
- Huelgo de anchura de caja para posibilitar el desmontaje de la junta sin dañarla. 1 mm
- Anchura de la caja (con huelgo de 1 mm) $0,5 + 2,5 + 1,0 = 4,0$ mm

Una vez dimensionada la caja, si se montase una junta o-ring (tórica) de distinta medida, por ejemplo de 3 mm, el grado de aplastamiento impuesto sería diferente. Eso podría afectar a el deterioro mecánico por exceso de

deformación del elastómero (grietas, etc.), apriete excesivo de la tapa, (transmitiendo esfuerzos a la pared del cilindro, que podrían agrietarlo o romperlo), y otros problemas que pueden dañar la junta.

Por ello es conveniente valorar a priori las tolerancias que admiten las posibles juntas en nuestro caso. Eso es fácil de estimar gracias a una herramienta de cálculo On-line, disponible en la web

Esos oring también sirven para facilitar un ajuste mecánico amable, entre la tapa y el cilindro.

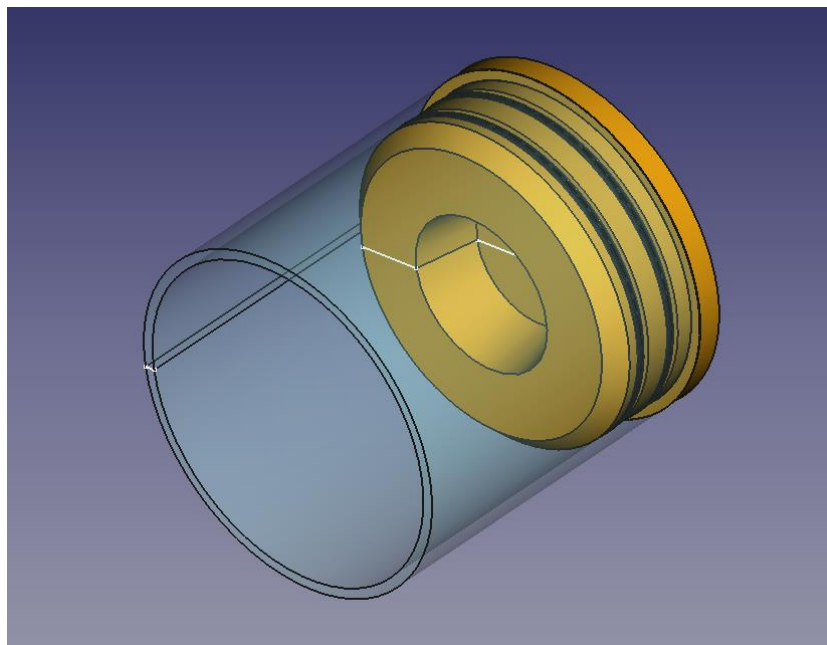


Ilustración 75 Tapa proa. Fuente Propia.

Para ello sería necesario que el ajuste se hiciera entre el disco de la tapa y el canto del cilindro, a lo largo de una circunferencia u oring, pero sometido a compresión fuerte. Eso es viable. Pero solo para tapas semifijas.

Por otro lado, se plante una reflexión sobre la redundancia de anillos. Parece que unas pocas superficies de contacto, bien cuidadas, puede ser mejor que muchas con peor controlabilidad de su estado. Nosotros hemos optado finalmente por 2 toroides, en paralelo, con función de estanqueidad duplicada, pero que entre ambos aseguran estabilidad geométrica. Mantienen el

paralelismo entre los ejes del cilindro y de la tapa, y la inmovilidad angular de convergencia entre dichos ejes. La consecuencia es que las juntas toroidales no se mueven nada, y eso es bueno para su función.

Después de estudiar se descubre que el equilibrio entre dimensiones del anillo, cualidades del polímero elástico y dimensiones de huelgos y cajera es bastante delicado. El envejecimiento de las juntas tóricas tiene que ver con la pérdida de la dureza-elasticidad que se le pide a una junta concreta en un sitio concreto. Este hecho subraya la importancia de un diseño CAD adecuado, y una mecanización precisa. Aquí es donde se hace valer nuestra impresora 3D.

Entre las directrices para la realización de este TFG habíamos hablado de la conveniencia de reutilizar elementos ya desarrollados, para reducir tiempo y trabajo. En ese sentido, la creación de una cámara estanca de capacidad variable (del orden de 40 cc) podría resolverse buscando una jeringuilla de plástico, comercial, de bajo coste.

Sin embargo, vamos a renunciar a esa solución simple, y nos vamos a ‘complicar un poco’ por el gusto de obtener un diseño escalable, sin las limitaciones comerciales, y fiable. Eso nos da la oportunidad de consolidar nuestras dotes de diseñadores de juntas estancas toroidales, que es una inversión en conocimiento que nos será útil en el futuro.

El principio de funcionamiento de la junta de la jeringuilla comercial es igual que el de la junta tórica de material elástico, de modo que, si el comercial funciona, debería hacerlo el de nuestro diseño propio si está bien hecho.

Con ello nuevamente estamos cerca de mantener el desafío de hacer nuestro propio émbolo con juntas tóricas.

Sobre esto podemos poner en práctica toda la teoría de diseño de las referencias, e incluso plantearnos en hacer una unión a medida con un cordón cortado y unido en forma tórica, con unión vulcanizada in situ con calor o con

un adhesivo tipo loctite... u otro que genere la adhesión requerida. Se descubre el cianoacrilato es un adhesivo adecuado y compatible para unir juntas de NBR (nitrilo de butadieno), el material más común en las juntas toroidales de las maquinas.

Las siguientes dos imágenes nos muestran las tapas que hemos conformado en 3D, las cuales han podido ser testada y comprobamos que realizan satisfactoriamente su función de estanqueidad.

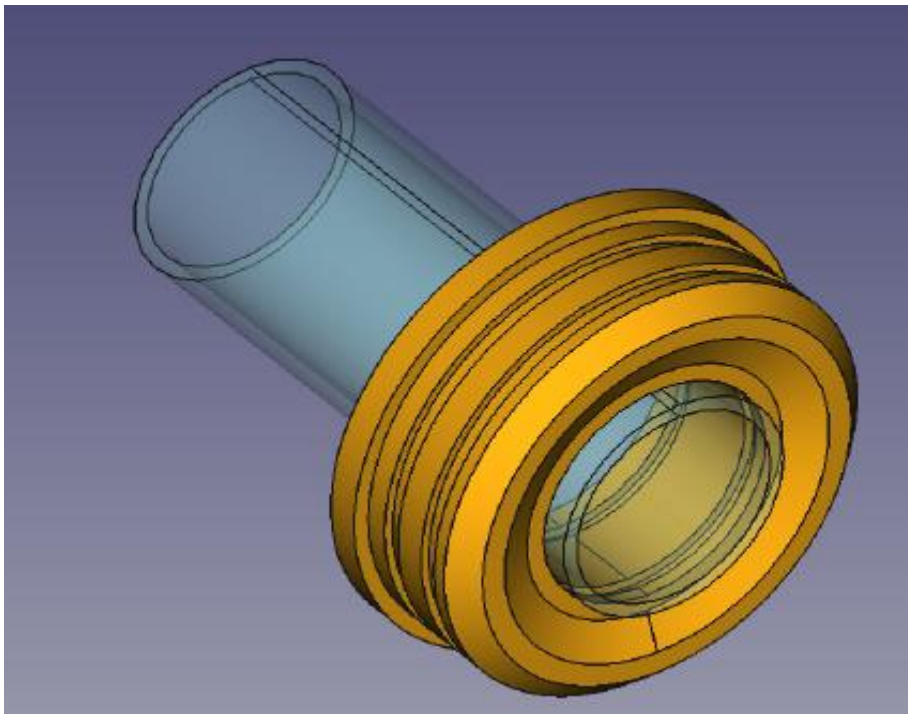


Ilustración 76 Tapa Proa 1.1. Fuente Propia.

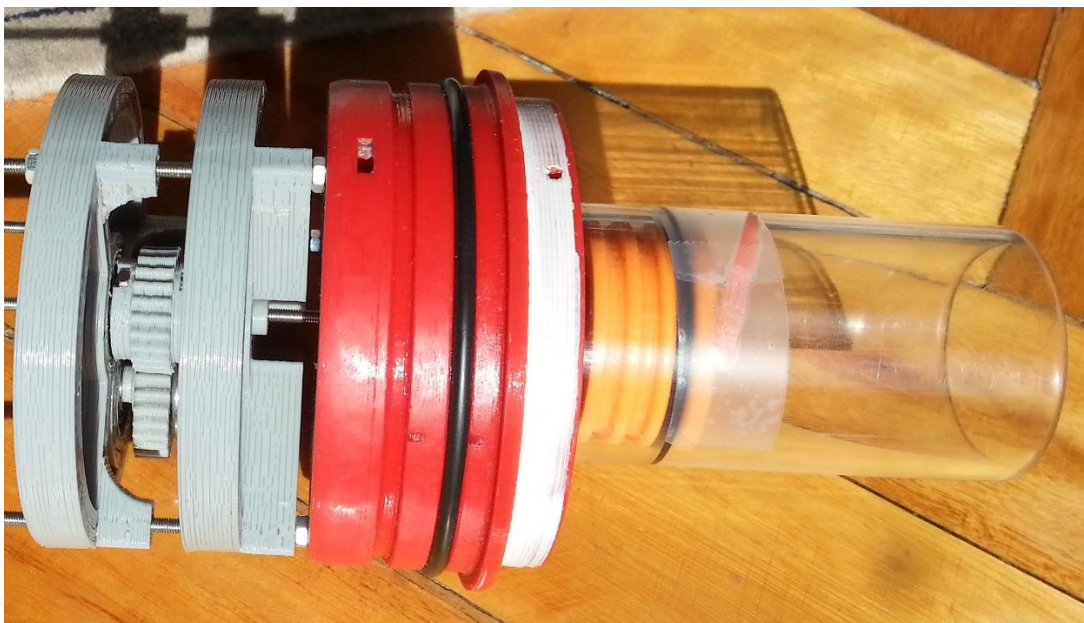


Ilustración 77 Conformado de tapa de proa y cámara de inundación Fuente Propia.

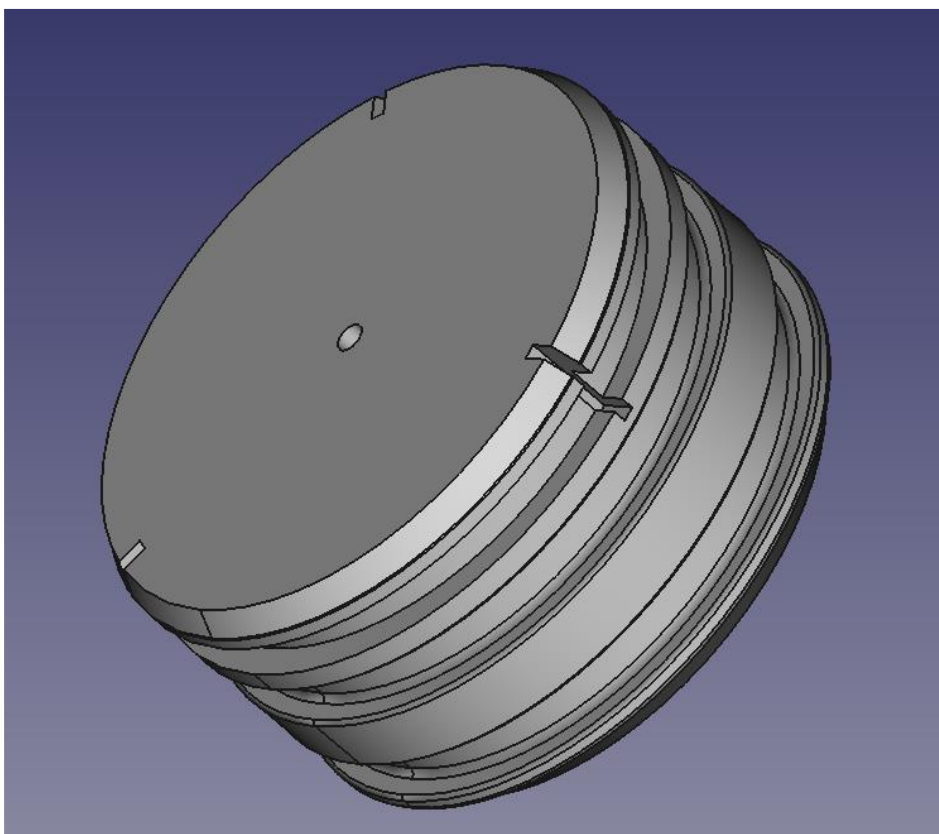


Ilustración 78 Conformado virtual de tapa de popa. Fuente Propia.

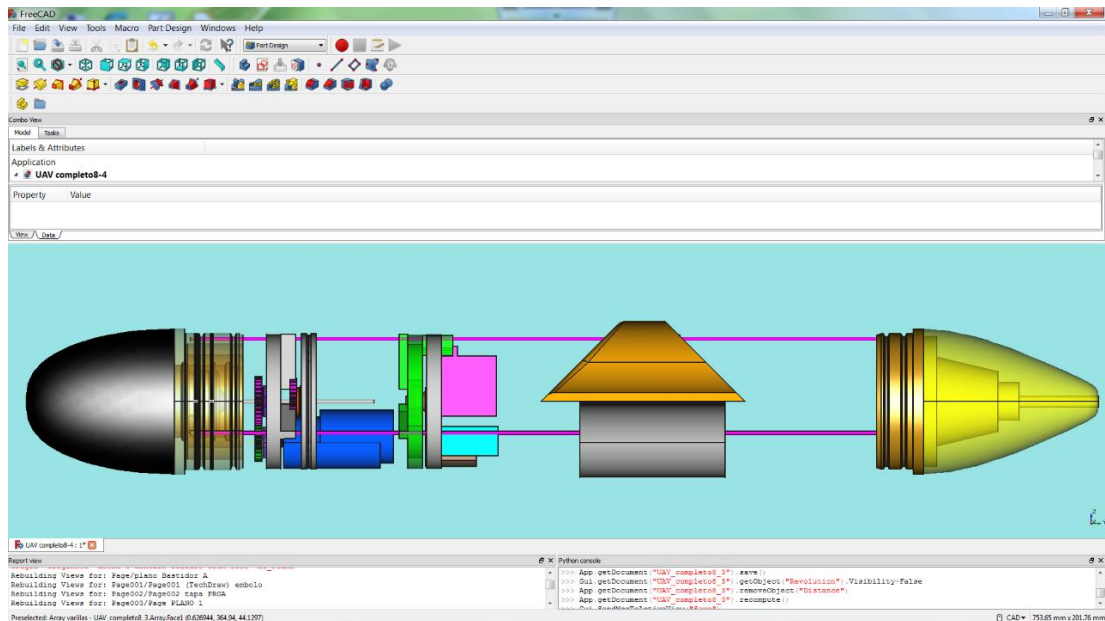


Ilustración 79 Pre-visualización de forma del submarino. Fuente Propia.

6.2.1.3 Procedimiento para conformar juntas toroidales de manera precisa.

Para producir esas uniones con la calidad deseada se ha diseñado y probado un procedimiento ad hoc.

Diseñamos en CAD una pieza (útil-herramienta) que permita fijar adecuadamente el cordón de la junta en una posición bien definida, y lo mantenga sujeto mientras realizamos, con un cutter, un corte limpio, plano y recto, ortogonal al eje del cordón.

Otra parte de esa pieza-herramienta, está provista para mantener bien alineadas, enfrentadas y presionadas adecuadamente los dos extremos de cordón que se pretendan unir con CA (cianoacrilato).

La pieza se ha diseñado en CAD, y permite reducir el factor de imprecisión-riesgo de la operación manual.

Permite sujetar firmemente la tórica, mientras se corta de manera precisa, sin

desviación ni rebabas.

En otra forma de operación, sujeta firmemente las 2 partes a unir, para que, con un movimiento de giro sobre una bisagra, ambas secciones puedan quedar presentadas, enfrentadas y presionadas levemente, mientras el adhesivo CA consolida la unión y unos pocos segundos. La herramienta garantiza uniformidad en la alineación y presión de las secciones extremas a unir.

El procedimiento también asegura que la longitud de la junta toroidal sea la determinada por los cálculos, y se ejecute con una tolerancia bien acotada ($\pm 0,25$ mm).

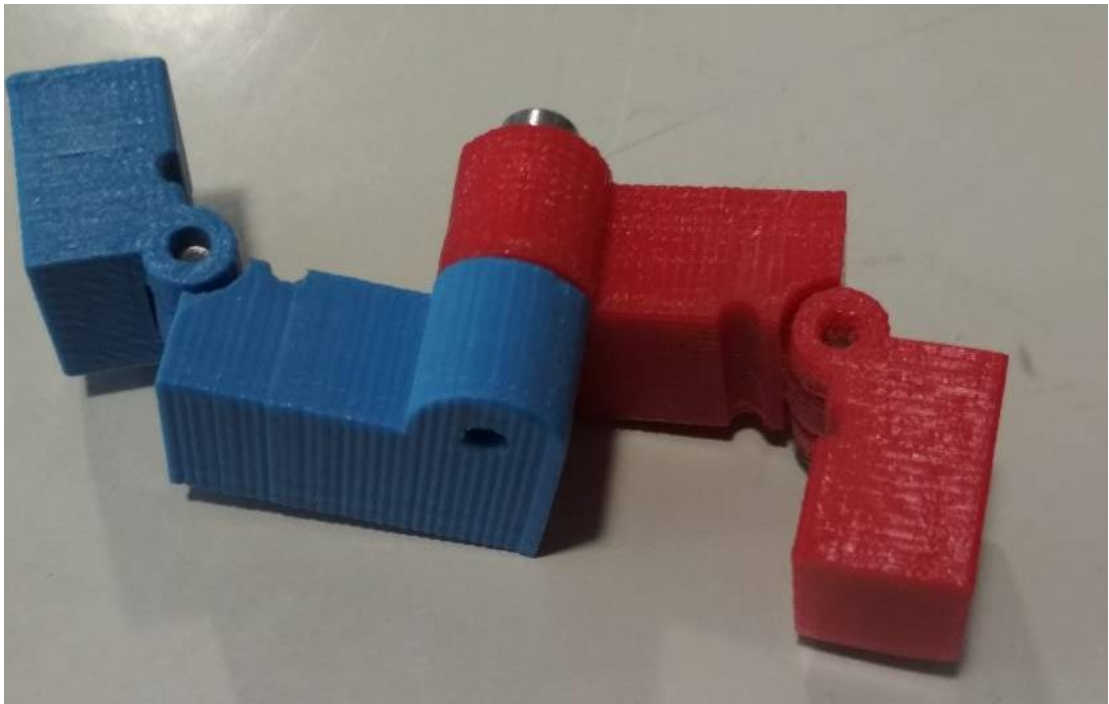


Ilustración 80 Usillo para unión de junta tóricas. Fuente Propia.

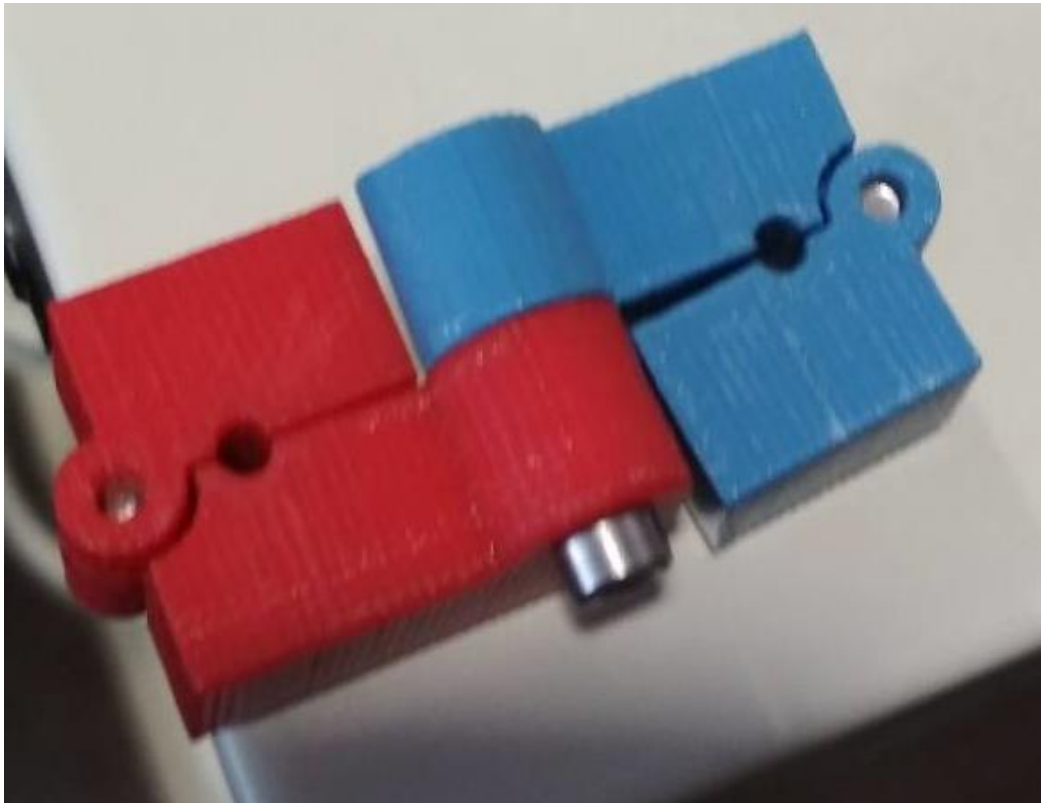


Ilustración 81 Visualización de usillo para la unión de juntas tóricas. Fuente Propia.

Sobre las juntas tóricas.

En la bibliografía hemos señalado documentación en español y en inglés, que describe la teoría y práctica del diseño de una junta.

Los parámetros delimitadores son:

1. Límites de estiramiento, compresión, etc. (en %), admisibles para el elastómero usado (NBR).
2. Medidas estándar disponibles de la sección transversal del toroide, cs (cross section).

Eso determinará:

1. Huelgo máximo permisible entre los dos cilindros que ajustan.
2. Profundidad de la cajera.
3. Ancho de la cajera.
4. Longitud, sin tensionar, de la junta tórica.

La junta, tal cual como se fabrica, está en reposo, sin tensionar el material. Pero al montarla las cosas cambian. Durante el montaje deberá admitir un estiramiento transitorio máximo, de cierta duración, con la fuerza y tensión que corresponda, calculable, para llevarla a su posición dentro de la cajera prevista para ella en la pieza.

Después de colocada la junta en la cajera de una de las piezas, tendremos la junta posicionada, pero aún no estará comprimida entre las dos piezas a sellar. Las dos partes estarán sin montar. Pese a ello la junta ya tiene una leve deformación que crea un apriete en su cajera, y ha modificado levemente su forma y cs (se ha producido estiramiento longitudinal, y cambio de sección). Finalmente, sobre esta geometría, adicionalmente se va a producir otra deformación, al integrar la otra pieza en el ajuste. Sobre ese ajuste último debe existir también un % de apriete, compatible con las normas de diseño, que asegura la estanqueidad al fluido presente, incluso si la presión diferencial entre los flacos de la junta es inapreciable.

Cuando la presión diferencial aumenta, la junta se deforma, aún más, dentro de su cajera, comprimiéndose hacia el lado de menor presión. Esa adaptación a rellenar los espacios libres de la cajera y la elasticidad del material, hacen que los posibles resquicios queden tapados, y el fluido no pase al otro lado de la junta.

Habíamos pensado en hacer una hoja Excel que facilitase el dimensionamiento de ese diseño, pero finalmente hemos encontrado una herramienta web que permite ese cálculo, y su fundamento está explicado en un documento también accesible en la propia página web. Ese será finalmente el medio que usaremos para determinar las dimensiones de las juntas toroidales.

appelrubber.com

<http://www.applerubber.com/oring-gland-calculator/#medium-search-field>

su uso es intuitivo y rápido.

The screenshot displays the 'O-Ring Gland Calculator' interface on the Apple Rubber website. The page features a dark header with the site logo and navigation links. Below the header, a red sidebar on the right contains icons for various tools. The main content area includes a 'Tools' section with a 'Show Full Description' link, a 'Send', 'Save', and 'Load' button bar, and a 'Show Full Description' link. The calculator is divided into several sections: 'Input' with fields for 'Piston Diameter', 'Groove Diameter', 'Bore Diameter', and 'Extrusion Gap'; 'Recommended Application Values' with checkboxes for 'Compression', 'Seal', and 'Volume Fill'; and 'Output' with fields for 'O-Ring Inside Diameter (ID)' and 'O-Ring Cross Section (C/S)'. A diagram on the left illustrates the gland geometry with labels for 'MIN GROOVE WIDTH' and 'N/A'. A feedback form is located on the right side of the calculator.

Ilustración 82 Programa de cálculo de juntas. Oring gland calculator.

Y obtenemos salidas en formato pdf, útiles para la documentación.

6.2.2 La resistencia estructural.

En este apartado hemos estudiado la resistencia mecánica de varias piezas relevantes:

El cilindro principal, resistente a presión hidrostática. Debe soportar sin colapsar la presión hidrostática sobre su superficie exterior, y también la carga axil que su pared recibe de las tapas extremas.

Las varillas longitudinales, que constituyen los distintos módulos de los bastidores interiores al cilindro principal. Estas varillas están sometidas a fuerzas de compresión y no deben colapsar por pandeo, la varilla de empuje del émbolo de control de la flotabilidad. Está sometida a fuerza axil de compresión y debe resistir al pandeo, anillo del bastidor que contiene el cojinete de empuje de la varilla anterior. Debe soportar a cortadura y flexión.

Alas del GLIDER. Deben soportar la manipulación del GLIDER fuera del agua, comportándose como asideros fiables. Su principal esfuerzo será de flexión. Como las alas se ha construido en estructura de Sandwich, el elemento más vulnerable es la piel sometida a compresión. Es una lámina cargada es su plano, que tiene riesgo de colapsar por pandeo.

Hemos comprobado las tensiones en esos elementos en las condiciones de diseño previstas, (25 m de inmersión, 5 kg de desplazamiento), y todos los casos están dentro de los márgenes admisibles de seguridad.

6.2.2.1 Calculo de la estructura, resistencia a la presión.

Así, la resistencia estructural del recipiente sometido a presión que es el AUV ha sido analizado con rigor. Primero hemos hecho una estimación con técnicas generales aplicadas a recipientes comprimidos, usados en la industria, y después hemos hecho una aplicación de un Reglamento de

específico para sumergibles, incluidos los tripulados, correspondiente a la Sociedad de Clasificación (SdC) American Bureau of Shipping (ABS). Esta SDC se especializó en los años 80-90 en clasificar la mayoría de sumergibles de uso civil en aplicaciones recreativas, turísticas, etc., que se operaban en las zonas tropicales del planeta (el caribe, mediterráneo, canarias, Mar Rojo, Hawái, Seychelles, Australia, etc., todos ellos focos de atracción turística de cierto poder adquisitivo, con playas y entornos marítimos espectaculares). Fruto de esos desarrollos es la evolución y garantía que supone ese Reglamento. De ese apartado y su comparativa se deducirán conclusiones.

6.2.2.2 Ideas generales sobre el colapso por implosión-pandeo.

La resistencia de un cilindro de pared delgada sometido a carga de compresión en sus extremos, y a la vez fuerza de presión exterior sobre la superficie cilíndrica ya está estudiado en la literatura técnica. Sus modos de fallo característicos son conocidos.

El fallo general más común y peligroso es el pandeo, que no muestra avisos previos. Sin embargo, antes de que se alcance la presión crítica que cause el colapso por implosión, pueden producirse deformaciones menores que también pueden suponer la ruina de la estructura.

Las tapas de los extremos, de cara plana, pueden deformarse curvándose hacia el interior y afectar a la geometría de la junta estanca. No es necesario llegar a la rotura para generar una filtración dañina.

Para evitar que esa deformación se produzca a presiones operativas, la forma de la tapa deberá engrosarse en su borde, de modo que se mantenga el ángulo recto entre el plano de la tapa y las generatrices del cilindro. Eso asegura la indeformabilidad de dicho ángulo cuando la presión sea grande. Sin entrar en detalles, se muestran algunos ejemplos de tanques sometidos a vacío con fallo por implosión (pandeo).

Este es un video de la implosión de un tanque sin rigidizadores tipo anillo....

<https://www.youtube.com/watch?v=Do2UOq3ACY0>



Ilustración 83 Colapso de cilindros por vacío 1. Felipe Artucio.

Este tanque si está rigidizado con diafragma. El video está en alta resolución, muy comentado y reiterado a cámara lenta...,

https://www.youtube.com/watch?v=0N17tEW_WEU



Ilustración 84 Colapso de cilindros por vacío 2. Wabash National.



Ilustración 85 Colapso de cilindros por vacío 3. Wabash National.

si es muy esbelto, ... <https://www.youtube.com/watch?v=T9bpUfWy8Wg>

a superlenta <https://www.youtube.com/watch?v=yBq5uapC-e0>

otros

<https://www.youtube.com/watch?v=g4NhinLZIOs>

el tema va conduciendo a análisis de recipientes sometidos a vacío o presión externa.

<https://pveng.com/home/asme-code-design/combined-loading/>

Colapso de un submarino,

sacado de <https://pveng.com/home/asme-code-design/external-pressure-methods/>

http://www.youtube.com/watch?v=7gr_muLpvUA

En los siguientes fotogramas sacados del video se puede apreciar la evolución en tensiones entra antes y después, cuando alcanza una presión de colapso.

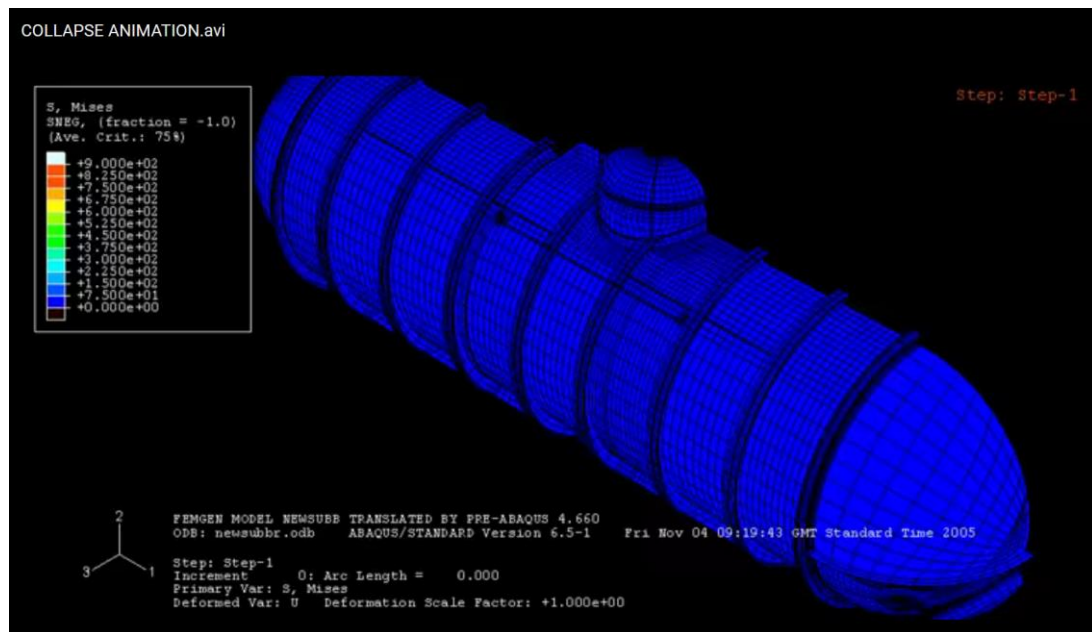


Ilustración 86 Evolución de tensión 1. Collapse animation.

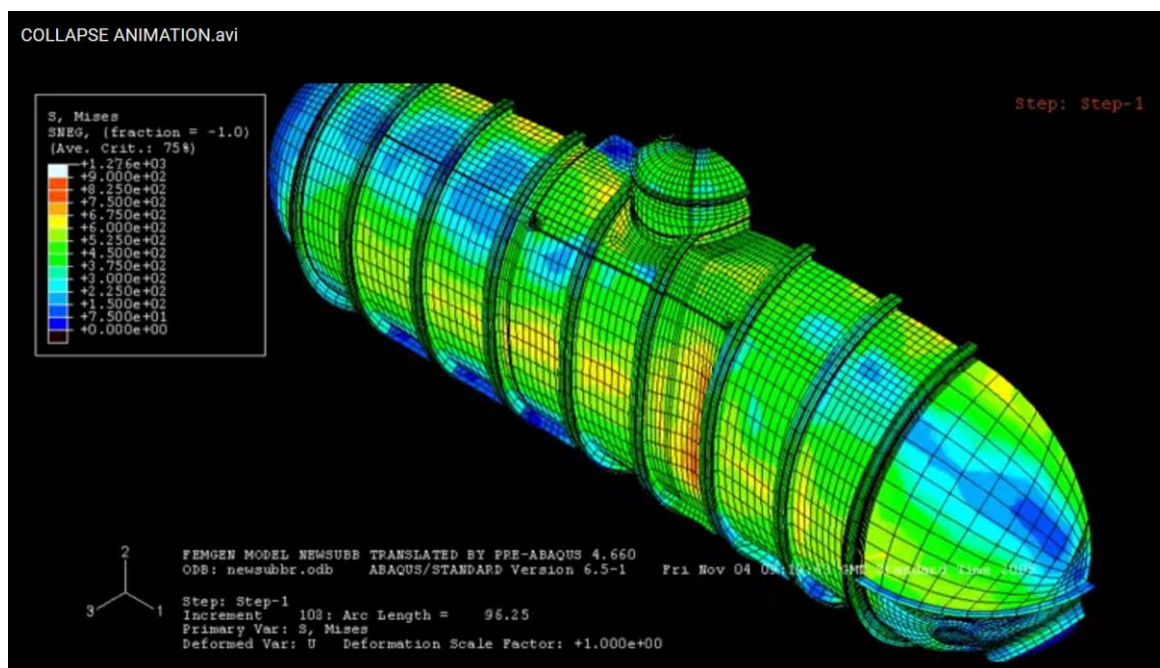


Ilustración 87 Evolución de tensión 2 Collapse animation.

El tema del pandeo de recipientes sometidos a vacío es sumamente extenso y complejo. Claramente los refuerzos tipo diafragma y según las generatrices tiene un efecto beneficioso, aumentando la resistencia, al reducir la luz de pandeo. Sin embargo, en nuestro caso hemos prescindido de refuerzos, y

hemos optado por una lámina uniforme de metacrilato, por simplicidad constructiva, cuya resistencia a pandeo puede ligarse a varios parámetros:

- Espesor
- Diámetro
- Longitud,
- Así como sus ratios

De lo que vimos en fotos y videos, se deduce que, en cilindros largos, el modo de fallo suele ser colapso acercando las generatrices al eje del cilindro. Cuando el cilindro es corto respecto al diámetro, el modo de colapso es acercando las bases extremas entre sí.

A medida que reforzamos según un patrón, el riesgo de colapso por ese modo se aleja, y el modo más probable se aproxima al otro.

En un sucesivo ajuste del reforzado entre ambos modos llegaríamos a un punto en que ambos modos serían equiparables, y cada panel cuasi cuadrado se asimilaría a un rectángulo con cargas coplanarias de compresión en sus lados cortos.

El modo de fallo se parece a un pliegue en diamante o rombo de cada uno de esos paneles.

Volviendo al tubo no reforzado esbelto que tenemos, el modo más probable será aplanarse juntando sus paredes laterales, como un tubo de pasta de dientes.

Para ese modo de colapso podemos encontrar una expresión cualitativa en términos de espesor, D y L , con el que podríamos incluso encontrar alguna expresión adimensional de semejanza de ese fenómeno.

Desde luego nada comparable con la pura experimentación, pese a la dispersión de los resultados esperable en un fenómeno tan sensible a

pequeñas variaciones iniciales, imperfecciones superficiales, etc. como es este del pandeo.

Dado que el fallo estructural por pandeo en este caso es catastrófico, y repentino, la responsabilidad es muy grande. Vamos a usar varios métodos de cálculo para hacernos alguna idea de la dispersión de los diversos modelos.

ABS sumergibles

ASME

otros

Haremos unas tablas con los resultados de los diversos métodos, y tomaremos una decisión conservadora. En nuestro caso estamos limitados por el cilindro que vamos a usar, y tenemos como parámetros de ajuste la presión máxima operativa y el espaciado de los anillos de refuerzo-diafragmas.

Podemos acudir a códigos de cálculo y diseño de recipientes a presión (externa), tal como

https://www.engineersedge.com/material_science/pressure_vessel_external_pressure_calculations_9857.htm

13.7. DESIGN OF VESSELS SUBJECT TO EXTERNAL PRESSURE

13.7.1. Cylindrical shells, pag 825-835 del documento:

[http://dl4a.org/uploads/pdf/Coulson Richardson's Chemical Engineering Vol.6 Chemical Engineering Design 4th Edition.pdf](http://dl4a.org/uploads/pdf/Coulson_Richardson's_Chemical_Engineering_Vol.6_Chemical_Engineering_Design_4th_Edition.pdf)

que he descargado. Y se encuentra en la bibliografía
otras referencias de cálculo

https://www.engineersedge.com/pressure_vessels_menu.shtml

También se ha encontrado otra fuente técnica con formulación aplicable:

Del libro:

Piping and Pipeline Engineering. Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair, by George A. Antaki

en su apartado:

5, External Pressure

5.1 BUCKLING PRESSURE

texto también encontrado en la web:

<https://www.engineeringlearninghub.com/wp-content/uploads/2017/04/Piping-and-pipeline-engineering.pdf>

Finalmente se ha calculado en una hoja Excel, con los datos de nuestro caso, y aplicando las fórmulas de la sección correspondiente de **Chemical engineering design**, obteniendo resultados razonables (profundidad máxima operativa = 10 m, con cilindro de metacrilato de pared 3 mm, y 500x100 mm). Ese cálculo se ha hecho asumiendo que no hay refuerzos en la pared del cilindro. Si quisiéramos aumentar la presión admisible, deberíamos usar un espesor mayor y/o reforzar la lámina con rigidizadores en posición de diafragmas, y/o generatrices.

Existe una distancia máxima entre diafragmas, de tal modo que si los separamos más no serán eficaces para evitar el pandeo. Por el contrario, si colocamos diafragmas a distancias inferiores, la presión crítica de pandeo aumentará. Las tapas extremas del cilindro se comportan también como diafragmas. La distancia crítica calculada es, unos 650 mm, lo que significa que con distancias inferiores mejoramos el comportamiento. Después de hacer unos cálculos se constata que estamos en una zona donde la reducción de la luz entre diafragmas aumenta la presión crítica de pandeo de forma casi lineal. Para 3 tramos (2 diafragmas intermedios y 2 tapas en los extremos) equidistantes, obtenemos una presión crítica de pandeo que triplica la inicial: $3 * 9 \text{ m} = 27 \text{ m}$ de profundidad admisible.

Como parte final (de la construcción del casco resistente) cabría realizar algún ensayo real para ver que se alcanza la presión operativa prevista, sin que la

estructura colapse por pandeo. Esto se hace en la realidad siempre, y muy especialmente en los submarinos tripulados. Durante esa prueba, el sumergible sin personas a bordo es sumergido ayudándolo de lastre adicional hasta la profundidad operativa, y se mantiene un cierto tiempo para posteriormente, en la superficie, comprobar filtraciones y deformaciones. Tras ese ensayo con éxito se procedería a equipar todos los componentes restantes.

Por curiosidad científico-técnica, vamos a aplicar como alternativa otro método de cálculo, el indicado en el reglamento del American Bureau of Shipping (ABS) sobre sumergibles, indicado en la bibliografía. La clara ventaja de este reglamento es que es específico de sumergibles.

6.2.2.3 Calculo del casco de presión por el reglamento ABS.

Nuestra fuente de referencia principal para el dimensionamiento de la estructura es el reglamento del ABS para sumergibles. Aporta reglas técnicas claras y precisas. Eso da un rigor técnico y académico al trabajo.

Después de diversos tanteos con los cálculos del modelo ABS UAS, se obtiene resultados consistentes.

1. Profundidad admisible 25 m, por la presión límite por pandeo, etc.
2. Requiere 1 anillo resistente o rigidizador fuerte a media eslora, además de las tapas extremas que también cumplen esa función.
3. Las tapas extremas y el anillo intermedio deben estar ligadas al cilindro simulando una soldadura continua, (así lo dice el ABS rules) es decir no basta que limiten desde el interior la deformación de compresión, sino que deben recoger también la hipotética

deformación hacia fuera del cilindro como si estuviera limitado externamente. Para ello tendremos que completar la estructura con 3 zunchos externos coincidentes con las 3 secciones definidas para esos refuerzos.

He decidido que esos zunchos tengan un tipo de fijación similar a la de los anillos interiores, con juntas tóricas que faciliten en ajuste, pero sin huelgo ni excesiva presión.

Las tapas de los extremos podrían incorporar el zuncho como parte de la tapa, lo que daría mucho soporte estructural en cada extremo. Pero si eso hace que la fabricación y ajuste de las juntas tóricas sea problemático, lo convertiremos en zunchos independientes de las tapas.

Funciones de Estanqueidad combinado con resistencia tapas, juntas y refuerzos.

Ya he hecho algún diseño en FREECAD: En ambos casos, el cierre en el canto del cilindro es el de mayor apriete, por presión, y no lleva junta de NBR (caucho sintético, nitrilo de butadieno)

1. Tapas extremas con ajuste interior por 2 tóricas
2. Tapas xtr. Con ajuste interior + exterior por 2 + 2 tóricas.

El anillo zuncho del centro podrá entrar deslizándose desde un extremo, y ser de una sola pieza, con 2 tóricas del mismo tipo que las de las tapas, pero cuya misión es, en este caso, puramente de ajuste amable, que haga acción opuesta al anillo del interior, del mismo estilo.

Ese anillo zuncho del centro puede quedar sustituido por una pieza que haga esa función, y que sea la base de los planos de sustentación. En ese caso, quizá sea más adecuado que su montaje se haga por dos semi casquillos, unidos por tornillos convencionales, formando una abrazadera.

La diferencia con el otro caso, es que los planos ejercen unas acciones

distintas de la pura compresión en esa estación, y no queremos que dé lugar a deslizamiento sobre el cilindro. En su lugar queremos que queden firmemente fijados donde se decida, aunque desmontable y de posición variable a voluntad.

6.2.2.4 Cálculo del casco de presión por el reglamento ASME.

Inspirado en lo señalado en el trabajo de VaCAS, descrito en el epígrafe (*componentes considerados en la síntesis proyectiva*) de este TFG, hemos hecho una revisión del procedimiento conforme a las reglas de ASME., según lo indicado en el chapter 5 de la ref VaCAS.

6.2.2.5 Fuerza axial sobre el émbolo móvil de la cámara de flotabilidad.

Aparte de la resistencia del cilindro de presión, hay que disponer un sistema que permita soportar la fuerza que en dirección del eje del cilindro transmiten las tapas de los extremos.

La tapa fija (en popa) descarga la fuerza resultante de la presión sobre el canto del cilindro. Adecuadamente dimensionado, el sistema será suficientemente resistente.

Sin embargo, la cara donde se dispone el mamparo móvil que cambia el volumen de la cámara de flotabilidad tiene un estudio distinto.

La presión que actúa sobre la parte fija de la tapa, se descarga sobre la pared del cilindro, pero la presión que actúa sobre la cara frontal del émbolo móvil debe estar contrarrestada por una reacción al otro lado.

Esa reacción se transmite del émbolo al vástago (husillo roscado), que a través de la tuerca lo transmite a una chumacera. La chumacera actúa como

una chumacera de empuje. Debe permitir girar la tuerca con poca fricción, pero ha de recibir y soportar el empuje axial (en la dirección del eje del husillo) transmitido por el flanco lateral de la tuerca.

En unas condiciones normales de diseño, esa chumacera transmitiría ese empuje al cuerpo del cilindro de presión, pero en nuestro caso dicho cilindro de presión es intacto, no podemos pegar en él nada por el interior. La razón es que no podemos garantizar un acceso franco para asegurar una buena unión, y además cualquier fijación a las paredes interiores podría obstaculizar el acceso al espacio o limitar su usabilidad. Como consecuencia de ello, deberemos hacer que la carga sobre la chumacera sea transmitida por el bastidor interior hasta descargar sobre la otra cara de cierre del cilindro de presión. Es decir, crearemos un puntal o contrate que soporte la compresión recibida por el émbolo (en un extremo del cilindro), y por la tapa fija (en el extremo opuesto).

Ese puntal también aliviará (recoge parte de) la carga de compresión, en la dirección axial, sobre las paredes del cilindro de presión. Es decir, será un refuerzo ante el modo de compresión que colapsaría el cilindro de presión por acercamiento de sus tapas extremas.

Vamos a estudiar a pando ese elemento, pues también es crítico.

Se puede descomponer en 2 tramos principales.

El primero está entre el émbolo y el apoyo de la tuerca accionadora en la chumacera. Queremos se construya y comporte como empotrado-apoyado en sus extremos. Su luz de pando real será del mismo orden que la carrera del émbolo, por ejemplo, unos 6 cm. Su diámetro puede ser del orden de 3 mm. Será una varilla roscada. La carga que ha de transmitir es $\text{área émbolo} \times \text{profundidad} / 10 \text{ kg}$. Para 30 m de profundidad serán unos $3 \times 8 = 24 \text{ kg}$. La varilla de 60x3 mm debería soportarlo. Veamos el margen disponible por el cálculo de pando.

Para los siguientes tramos, la chumacera va a servir para distribuir la carga entre 3 varillas que se situaran equidistantes en una circunferencia próxima a la pared del cilindro. Como la carga que transmiten es $\frac{1}{3}$ de la del primer tramo, es previsible que estén sobradas ampliamente respecto al pandeo. Serán igualmente varilla roscada de 3 mm, y su luz de pandeo dependerá de los diafragmas -bastidores dispuestos a lo largo del cilindro. Deberán considerarse como apoyados en cada uno de los diafragmas. Eso determinará el cálculo de cada uno de los tramos.

6.2.3 Flotabilidad, estabilidad, propulsión y gobierno.

En un GLIDER (a diferencia de un buque convencional, de superficie) los conceptos de propulsión, gobierno, estabilidad y flotabilidad están totalmente interrelacionados y su estudio debe partir de la flotabilidad, como causa de todos los demás efectos.

6.2.3.1 Formas alternativas de variar la flotabilidad.

Variación de volumen:

Nosotros manejamos la solución de desplazar un émbolo que cambie al volumen de agua desplazado por el AUV. Eso se hace variando a la vez el volumen de aire en el interior, pero sin cambiar la masa. También puede ser interpretado como que en un volumen de control determinado, constante, se deja inundar una parte (la cámara de flotabilidad), de modo que la masa dentro de ese volumen varía. Este procedimiento es simple y eficaz para profundidades moderadas, menores de 15 m. La opción de mover el mamparo del émbolo requiere una fuerza proporcional a la presión y al área del émbolo, y eso puede ser demasiada fuerza para un mecanismo móvil. Por ello esa solución solo se admite en sistemas pequeños y a poca profundidad, como el nuestro.

Variación de masa:

Sin embargo, para grandes profundidades, esa solución no es buena. La única manera de superar profundidades de 50-100 m, es usando aceite. Veamos cómo funciona ese otro sistema. En el interior de AUV hay un depósito de aceite, como fluido de calidad, no corrosivo, controlado y limpio, incompresible, que puede ser bombeado hacia el exterior, donde ocuparía una vejiga impermeable, flexible, sin aire, y en equilibrio con la presión del

agua exterior. El aceite en el exterior se mantendría dentro de un circuito cerrado pero a la presión exterior. No se mezclaría con el agua, ni tendría fugas. Parte de la masa de aceite del depósito interior sería bombeada a la vejiga, en el exterior del caso de presión, con lo que la masa total en el interior se reduciría. Como el volumen externo del casco de presión no varía, la flotabilidad resultante sería variable a voluntad. Podemos imaginar el caso de que el líquido fuera agua. Una masa controlada bombeada de fuera a dentro, en el exterior ocuparía un volumen (en equilibrio de presión con el exterior), y al ser de la misma densidad, su flotabilidad sería neutra. Una vez dentro, podría estar a presión del aire interior, (próximo a la presión atmosférica), y ocuparía un volumen muy similar, pero la masa habría quedado transferida al interior, con la pérdida de flotabilidad correspondiente del AUV. A la inversa si se bombea hacia afuera.

Si el fluido es aceite, en general de densidad menor que el agua, las cuentas son parecidas, pero la flotabilidad del volumen de aceite en el exterior sería levemente diferente.

2.1. The Buoyancy System

2.1.1. Basic Concepts

Gliders are controlled through hydrostatics (vertical forces) and manipulate hydrostatic balances in order to accomplish roll and pitch of the vehicle. Stability of the vehicle is a major critical factor: a stable vehicle has the centre of gravity below the centre of buoyancy. In this configuration, the weight of the vehicle creates a restoring moment to add stability to the vehicle. Roll and pitch on the glider is accomplished by moving the battery pack. Figure 4 below displays a basic concept of a buoyancy system for the glider [30–36].

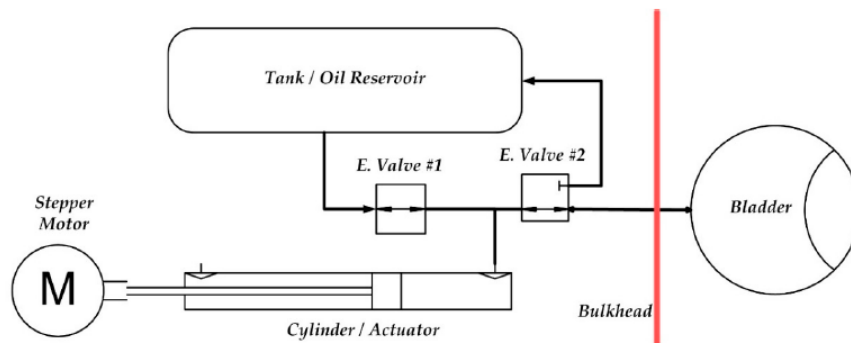


Figure 4. Basic scheme of the buoyancy system.

The system is extremely simple: while descending, hydraulic fluid moves from the external inflatable bladder, which produces a high pressure in the internal reservoir, which is at a low pressure through a valve: the decrease in volume of the bladder creates an increase in density, causing negative buoyancy [37–44].

While ascending, hydraulic fluid moves from internal accumulator to the external inflatable bladder through the pump. The increase in volume creates a decrease in density causing positive buoyancy. The seawater also flushes out the open hydrodynamic fairing of the vehicle, aiding it to rise to the surface. For neutral buoyancy, the vehicle must have a density equal to seawater [45–52].

Ilustración 88 Sistema alternativo de variación de la flotabilidad. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

Resumiendo.

1. Nosotros manejamos masa constante, y volumen variable. Movemos el émbolo que hace de mamparo móvil límite con el exterior
2. otra solución es mantener el volumen constante, y modificar la masa interior. El intercambio se hace a través de un conducto de sección muy pequeña, y manteniendo ese conducto como un sistema cerrado, a presión. Esa es la solución adecuada para grandes presiones (profundidades).

Si la profundidad y/o el tamaño del AUV es grande, el mecanismo de bombeo de un volumen de líquido entre el interior y el exterior es una opción más segura y asequible con las técnicas usuales de la tecnología hidráulica de maquinaria industrial. Aquí el factor limitador es solo la presión. En realidad,

a nivel de ingeniería industrial, se convierte en una solución más estándar y conveniente que la de variación de volumen. Pero en este TFG no es la opción que vamos a seguir.

6.2.3.2 Desarrollo de la opción de variación de volumen.

El diseño seguido por nosotros en este punto consiste en hacer variar el volumen contenido en el cuerpo de una jeringuilla moviendo para ello el vástago del émbolo por medio de un husillo accionado por un motor. Una tuerca asociada a ese husillo y solidaria al vástago hace que este siga un movimiento lineal cuando el husillo gira. Este mecanismo es simple, y ofrece una variación continua y precisa. Pero para poder discriminar variaciones muy pequeñas de lastre, es necesario que la sección del émbolo sea relativamente pequeña.

En efecto, si nuestra cámara debe tener unos 40 cc, y el émbolo tiene el mismo diámetro que el interior del recipiente – casco resistente, tendremos un área de émbolo de $A = \pi \cdot D^2 / 4 = \frac{3}{4} \cdot 10 \cdot 10 = 75 \text{ cm}^2$, lo que significa que la carrera que ha de producir el husillo es $V/S = 40 / 75 = 1/2 \text{ cm} = 5 \text{ mm}$.

Ese recorrido tan pequeño no va a permitir un control preciso de la cantidad de lastre controlada por el husillo.

Por el contrario, si asumimos que manejamos un recorrido de émbolo de unos 30 mm, significará que el área del émbolo ha de ser: $A = V/\text{dist} = 40 / 3 = 13 \text{ cm}^2$.

Como $A = \pi \cdot D^2 / 4$

Lo que significa un diámetro de émbolo.

$$D = (4/3 \cdot A)^{1/2} = 4 \text{ cm}.$$

Eso es una medida bastante moderada, que debería facilitar el mecanizado

del émbolo, aunque nos obligue a disponer de otro cilindro (distinto del propio cuerpo cilíndrico del AUV) con diámetro calibrado uniforme (aproximadamente 3 cm), que haga de cuerpo de esa jeringuilla. Ese cilindro puede ser el propio cuerpo de una jeringuilla comercial (ese podría ser el caso, si lo que queremos es hacer una prueba de concepto con una junta diseñada por nosotros, con una tórica).

El abanico de posibilidades que tenemos es bastante amplio.

Otra variante es hacer que sea la tuerca la que gire (por ejemplo, solidaria a un engranaje concéntrico), entre topes axiales, y que de ese modo sea el husillo el que avance, sin girar. Eso puede permitir una multiplicación adicional entre el giro del motor accionador y el giro de la tuerca, y además puede reducir la longitud de todo el conjunto motor eje husillo émbolo. Así será más compacto.

Hemos mencionado el motor, que podría ser de tipo paso a paso, para controlar su movimiento tanto en velocidad como en posición, con un par notable. Un modelo NEMA 17 es bastante común y tiene un precio moderado, unos 12 euros. La electrónica que necesita para moverse también es común y conocida. Existen estándares de bajo coste alrededor de la plataforma ARDUINO, que cumplirían bien el cometido.

Paradójicamente, un motor pequeño de corriente continua sería más difícil de controlar con precisión, y además su par sería bastante peor que el del Stepper. A eso hay que añadir que la solución con el Stepper está bastante estudiada y se ha convertido en un estándar de la robótica doméstica DIY.

CALCULO DEL PAR DEL MOTOR DE ACCIONAMIENTO DE LA TUERCA-husillo

Para decidir sobre el tipo de motor a usar, también es necesario saber que par ha de dar ese motor. Asumimos que las rpm no es un factor limitante, porque no hay un requisito de que las maniobras sean especialmente rápidas. Por tanto, el único factor limitante será el par.

Para estimarlo razonaremos del siguiente modo.

El émbolo es presionado por el exterior, y el vástago interior ha de ser capaz de transmitir una fuerza compensadora.

Sea A el área del émbolo y p la presión exterior. La fuerza a vencer será

$$F = p.A$$

que es transmitida por el vástago roscado.

La potencia de accionamiento será

$$pot = F.v$$

Ese movimiento y potencia ha de ser causado por el giro de la tuerca, cuyos flancos no se dejan avanzar, La potencia que se requiere para hacer girar esa tuerca es:

$$pot = par . \Omega$$

$$\Omega = \text{vueltas/segundo (en radianes/s)}$$

Ω es la velocidad angular de giro de la tuerca, y está relacionada con la velocidad de avance del vástago a través del paso de la tuerca.

$$\text{Paso} = \text{avance/vuelta} =$$

$$v = \text{avance/segundo}.$$

$$\text{Paso}/v = \text{vueltas/segundo} = \Omega \text{ (en vueltas/segundo)}$$

$$par = F.v / \Omega = F.v / (\text{Paso}/v) = F. v^2 / \text{Paso}$$

Ese par hay que incrementarlo por pérdidas de rozamiento en la rosca de la tuerca, y entre el émbolo y el cilindro. Supongamos que son del 50% y además una parte fija, o constante, independiente de la actuación.

el par requerido para aplicar a la tuerca será:

$$par = par_0 + 1.5 * F. v^2 / \text{Paso}$$

Lo importante es que el par sea superior al par_0 , el resto afecta solo a posibilitar más velocidad. Par_0 ha de igualar al rozamiento estático del mecanismo. El umbral para que se pueda girar.

6.2.3.3 Configuración de la cámara de flotabilidad.

En este punto, hay que plantearse como es la disposición de ese elemento, pues va a afectar a su forma de trabajar.

En principio asumimos que es un tubo cilíndrico de menor diámetro que el casco exterior, y que atraviesa la tapa estanca de proa. Normalmente quedará una parte del tubo (la de popa) por dentro del espacio limitado por las tapas de proa y popa y expuesto a la presión interior del casco de presión, y otra parte (la de proa), que quedará a proa de la tapa de proa, expuesto a la presión exterior.

Según la posición del émbolo interior que hace de cierre estanco a la presión, el tubo que constituye la cámara de flotabilidad quedará expuesto a presión exterior, a presión interior, o a la misma presión por dentro y fuera, ya sea esa la presión interior o la exterior.

El siguiente esquema muestra las distintas posiciones y zonas y modos de trabajo de cada una de ellas.

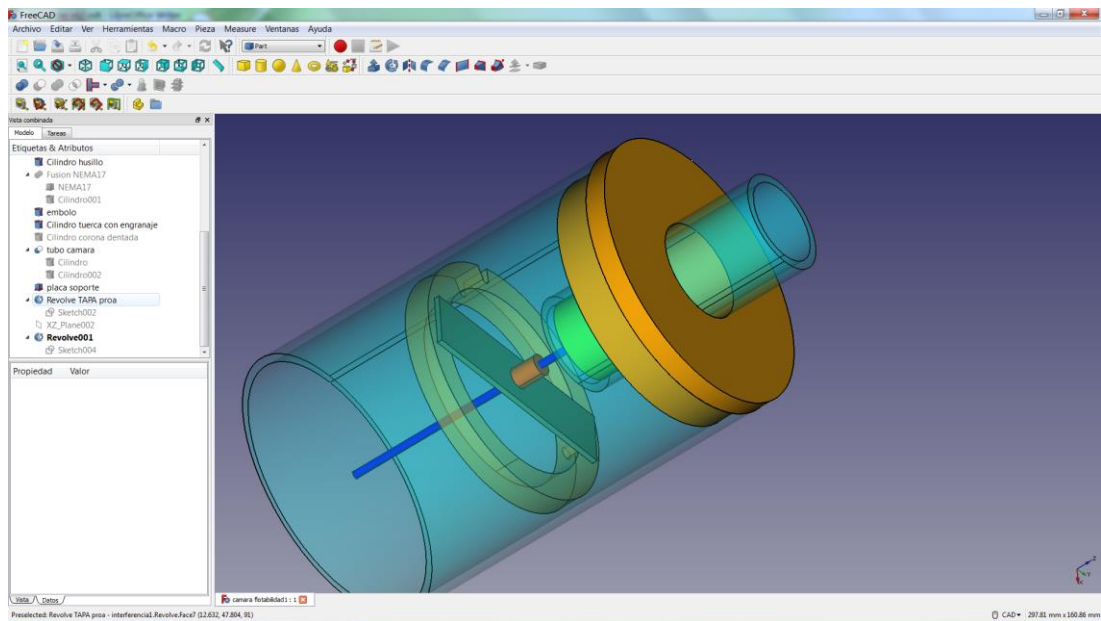


Ilustración 89 Embolo de inundación1 Fuente propia.

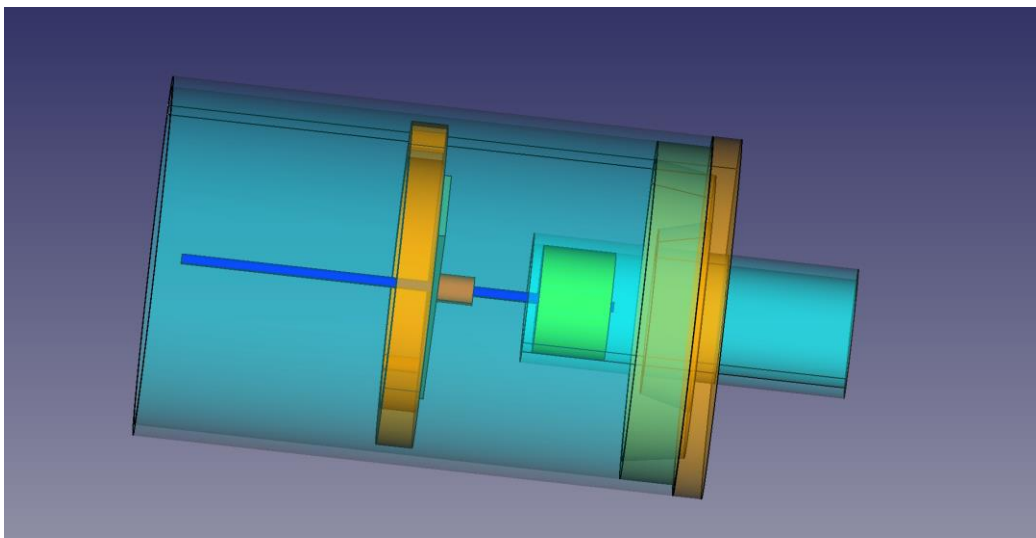


Ilustración 90 Embolo de inundación 2 Fuente propia.

A proa del émbolo (hacia la derecha en esta imagen), el agua inunda el cilindro de la cámara, por lo que la presión será la del exterior. A proa de la cara de proa de la tapa estanca (a la derecha), el agua del exterior crea presión sobre la parte externa del cilindro cámara de flotabilidad.

Por otro lado, a popa de la cara interna de la tapa estanca, el exterior del cilindro de la cámara de flotabilidad está sometido a la presión del interior del AUV. También a popa de la cara de popa del émbolo, el interior del cilindro cámara está sometido a la presión del interior del AUV.

La diferencia de presiones interior y exterior puede dar lugar a variación dimensional en el diámetro de la cámara. Eso no es deseable, porque puede afectar a la estanqueidad del émbolo sobre la pared de la cámara. Para evitar ese efecto, necesitamos un espesor adecuado en la pared de la cámara, y además un reforzado en forma de diafragmas. Ese reforzado ha de ser forzosamente por el exterior del cilindro, ya que por el interior el émbolo debe moverse libremente sin obstrucciones.

Todos esos condicionante, se resumen en una disposición concreta. La cara de proa del émbolo no debe avanzar hacia proa más allá de la cara de proa de la tapa estanca. Y en su recorrido hacia popa, todo el espacio de cámara por proa de la cara de proa del émbolo debe estar zunchado con refuerzo exterior adecuado.

Además del zunchado citado, hay que disponer una junta estanca entre el cuerpo de la tapa estanca de proa y el cilindro de la cámara. Esa junta es estática., y debe prevenir contra la presión del agua exterior.

También, dado que el líquido exterior no está controlado en su limpieza y calidad, habrá que tomar precauciones para que no entren cuerpos extraños que puedan alojarse en las zonas donde luchan las juntas estancas (dinámicas) que podrían deteriorarse. Será conveniente proteger esa toma

contra arenas, partículas en suspensión, etc.

6.2.4 Disposición de los mecanismos

Es deseable aquilatar al máximo la compacidad de los elementos que no sean el **payload**, para dar la máxima utilidad al vehículo como plataforma de experimentación y observación. Por ello, deseábamos que el husillo del émbolo de la cámara de flotabilidad pudiera disponerse en paralelo con el motor que hace girar su tuerca de accionamiento, y compartiendo la misma sección transversal del casco del AUV.

Al pensar en un motor tipo NEMA 17, comprobamos que su ancho (unos 47-50 mm) hace incompatible que en la sección interior del AUV puedan montarse en paralelo ambos elementos, ya que el husillo ha de ir necesariamente en el eje geométrico del cilindro, (por razones de equilibrio de acciones, simplicidad, etc. Si no puede montarse en paralelo, el mecanismo se complica y no nos interesa.

La siguiente imagen ilustra la interferencia entre el eje husillo (azul), y el cuerpo del motor NEMA17. Sus geometrías son incompatibles en esa disposición. El anillo naranja es un diafragma o anillo resistente que forma parte del bastidor interior y da soporte a los diversos elementos de los mecanismos. El émbolo se ve en verde, y en azul transparente se aprecia el cilindro que hace de cuerpo de la cámara de flotabilidad variable. No se ha pintado la tapa estanca de proa para no dar complejidad al dibujo. El cilindro de la cámara de flotabilidad lo atravesaría, haciendo cuerpo estanco con ella por el exterior de ese cilindro. La tuerca del husillo tiene movimiento axial impedido por el bastidor, por lo que al girar hace que el husillo se desplace longitudinalmente, arrastrando al émbolo.

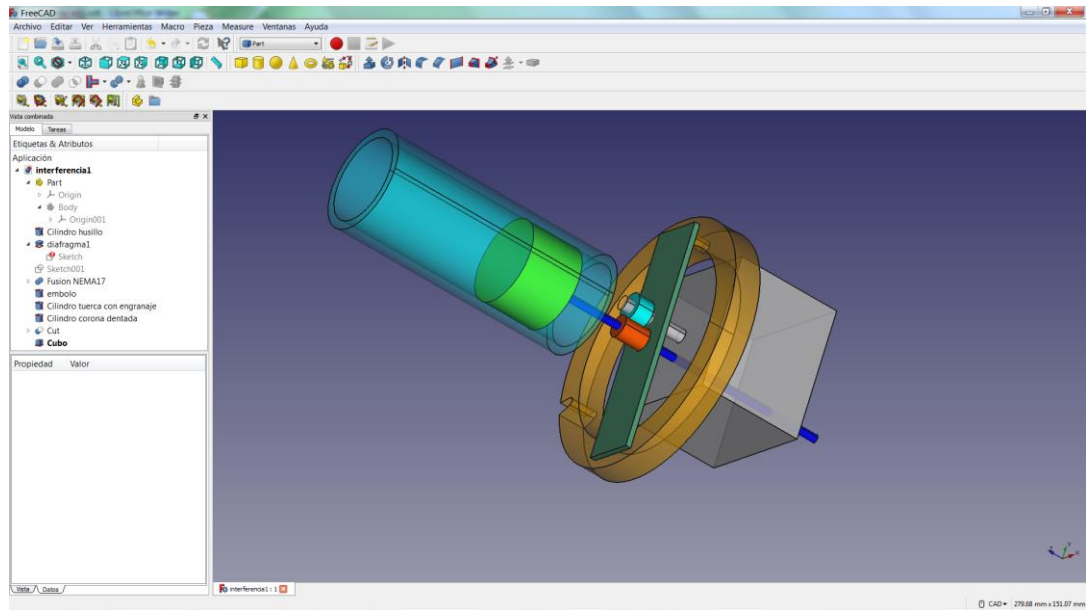


Ilustración 91 Sistema de inundación 1 Fuente propia.

Visto que la geometría del NEMA17 es incompatible con nuestros intereses, eso nos lleva a buscar otras alternativas, y surge la posibilidad de usar **servos eléctricos**, como los usados en aplicaciones de radiocontrol.

Parece que puede cumplir todos nuestros requisitos. Repasando:

1. son baratos y fáciles de conseguir.
2. son pequeños, y cumplen la exigencia de párrafos anteriores para compatibilizar su posición con el husillo.
3. dan un par de 3.1 Kg*cm.
4. pueden ser accionados directamente desde la placa ARDUINO, sin necesidad de placas driver adicionales.
5. consumen poca intensidad, y el código de programación en arducode no requiere librerías especiales, salvo las estándar.
6. pueden configurarse para movimiento continuo de giro, o para alcanzar una posición determinada. Ambas configuraciones podremos usarlas

en nuestro AUV. Una para el control de escora, y otra para el de trimado longitudinal.

Estas reflexiones nos encaminan hacia una solución con servos como alternativa.

Un modelo bastante usual es el S3003, que se muestra en la siguiente imagen



Ilustración 92 Servo motor estándar usado. Futaba.

trasladando un bloque con sus dimensiones al CAD, en la siguiente imagen ya se puede apreciar una muestra de las múltiples posibilidades de montar el servo, compatibilizando la presencia en paralelo del husillo en la misma sección.

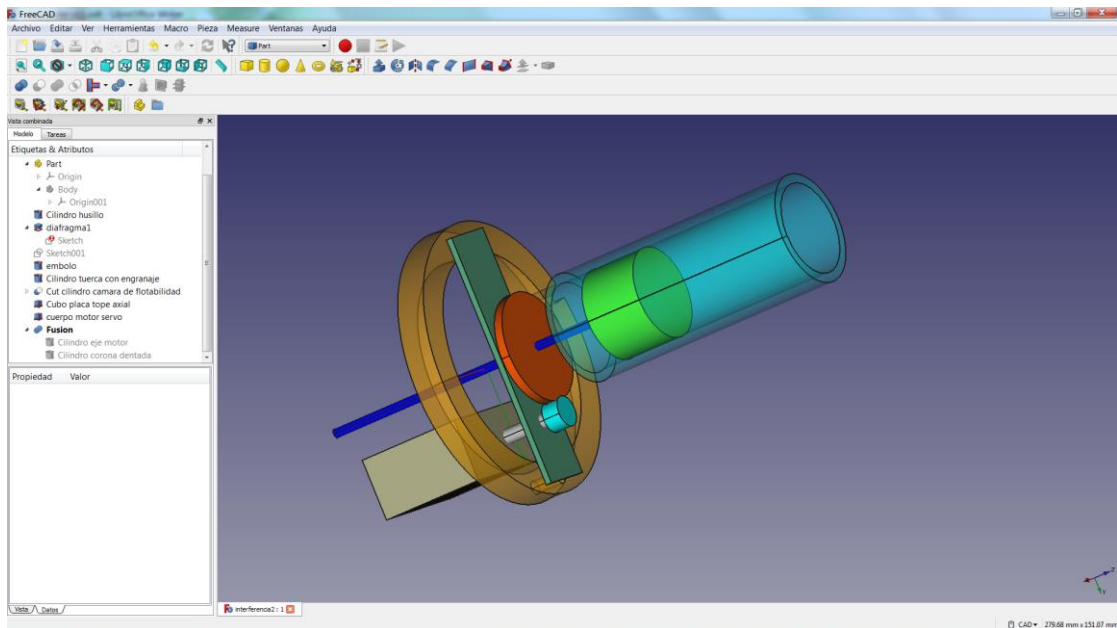


Ilustración 93 Sistema de inundación 2 Fuente propia.

6.3 Mecanismo modular de cambio de escora y asiento

Se realiza un sistema de balance, maniobra y aumento de grados de inmersión de proa para buscar un mejor rendimiento del inicio para inmersión y emersión del submarino.

Por esto se realiza un módulo compacto para buscar este factor, el cual consta de un grupo de materia usada para la alimentación de los equipos del submarino. Esta batería tiene un peso de unos 800 Gr. Este módulo desplaza este peso sentidos proa-popa, buscando no solo un mayor grado de inmersión si no también, moviendo el peso en sentido horario y anti horario para buscar la virada en las inmersiones o emersión.

Para estos dos movimientos se usaron dos servos, cada uno de ellos hace un movimiento. En la siguiente imagen se puede ver la colocación de estos dos servos, con el carro de inmersión y escora.

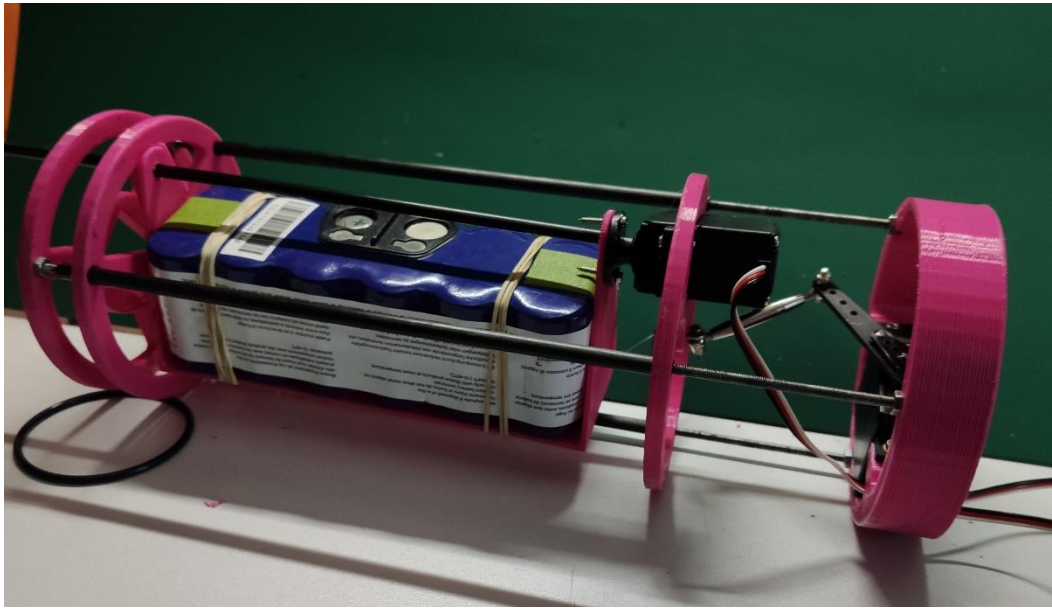


Ilustración 94 Imagen módulo de virada y balance de pesos Fuente propia.

6.3.1 Cálculos de pesos y posiciones

Se harán unos cuadros similares a los del balance económico, ya que intervienen todos los elementos (lista de items constructivos). El libro de conceptos es el hilo conductor del esquema de control de la construcción.

El cuadro contendrá principalmente la estimación del peso y el CDG longitudinal. También puede desearse una estimación del CDG transversal, así como sus posibles márgenes de variación.

6.3.2 Diferencia entre los objetos según que intercepten la superficie libre del fluido (flotantes) o no.

Hemos pensado que un momento escorante puede generar escora en un AUV sumergido. Parecía obvio. Sin embargo, es conveniente aclarar que el comportamiento de estabilidad de un flotador y de un objeto sumergido son bastante diferentes.

En general, en un flotador se cumple una relación entre el momento escorante y la escora (cuando esta es moderadamente pequeña, $< 20^\circ$) que es:

$$M_{esc} = DESPLA \cdot GM \cdot \sin(\text{teta})$$

siendo

- M_{esc} el momento escorante
- DESPLA, desplazamiento
- GM altura metacéntrica
- teta, angulo de escora. Este es un concepto de escora 'generalizado', a cualquier inclinación respecto a un eje paralelo al plano de flotación.

por otro lado

$$GM = KB + BM - KG$$

Siendo:

- KB, altura del centro de carena sobre una referencia de base, K
- KG, altura del cdg sobre la misma referencia, K
- BM, radio metacéntrico respecto a una dirección (transversal, longitudinal, otra...)

$$BM = \text{Inercia} / \text{NABLA}$$

Siendo:

- Inercia, el momento de inercia del área de la flotación, respecto a un eje con la dirección citada anteriormente.
- NABLA, volumen desplazado por la carena.

Mientras haya superficie de flotación intersectada por el cuerpo flotante, BM será no nulo, y la ley entre momento escorante y escora será la indicada.

Sin embargo, cuando al cuerpo se sumerge completamente, la superficie de flotación se hace nula, y con ella también su área, momento de inercia y BM. De modo que la ley anterior, clásica para objetos 'flotantes' se transforma en otra, propia de los objetos totalmente sumergidos.

En ese caso, la relación que se cumple es la que liga las posiciones del centro de carena (B) y el de gravedad (G)

Si B está por encima de G, el equilibrio será estable, y el AUV se comportará como un péndulo, donde el momento escorante genera una escora θ tal que:

$$M_{esc} = DESPLA. GB \sin(\theta)$$

en este caso todas las direcciones de inclinación (longitudinal, transversal u otra) son igual de sensibles, y el AUV se inclina tanto en trimado como en escora, dependiendo hacia donde se produzca el momento inclinante.

Por otro lado, si G está por encima de B, el equilibrio será inestable, y una pequeña perturbación de escora causará que esta no se estabilice, sino que continúe progresivamente hasta alcanzar un equilibrio 'estable', con B por encima de G.

Esto hace que la transición de superficie a inmersión pueda ser traumática si el sumergible no está bien diseñado. Cuando desaparezca la superficie de flotación, G deberá estar por debajo de B para que el AUV sea estable en inmersión.

Nótese que lo normal en los buques de superficie es que G esté por encima de B, por lo que cuando un buque de superficie se inunda y sumerge accidentalmente, puede mostrar en el último momento un giro brusco de vuelco a la vez que desaparece de la superficie. Ese comportamiento no sería aceptable para un vehículo sumergible.

Todo lo anterior se condensa en que nuestro AUV deberá mantener el cdg (G) por debajo del centro de carena B en todo momento para ser estable. Además, controlando el momento escorante controlaremos la escora según la ley descrita para los submarinos.

La determinación de la posición de B es un cálculo basado en la geometría exterior del flotador, y la posición de G puede calcularse también por la distribución de las masas de los componentes.

En nuestro diseño queremos disponer de un sistema de gobierno cuya eficacia va a depender del parámetro BG, y de la masa móvil que podamos desplazar para generar momento escorante.

Para un submarino se cumple:

$$M_{esc} = GB \cdot DESPLA \cdot \sin(\theta)$$

En los sistemas de control de los AUV que hemos visto, el mecanismo de gobierno mueve una masa en forma de péndulo en un plano vertical transversal, de modo que además de alejarse de crujía, esa masa se eleva, y con ello también lo hace el cdg de todo el sumergible, por lo que el brazo GB se reduce, y de ese modo, para una misma masa, el efecto en escor teta es mayor que si la masa no se elevase.

Como intuimos, cuanto mayor sea la masa movida mayor será el efecto.

Por otro lado, el posible movimiento de la masa móvil está limitado al espacio disponible dentro del submarino. Normalmente estos dispositivos son internos por cuestión de fiabilidad.

Imaginemos que la masa móvil es **mv**, y que puede girar alrededor del eje longitudinal del cilindro que es el casco de AUV. Dicho giro lo hace a una distancia r, fija mediante un brazo mecánico.

El momento escorante causado por la masa girada sería:

$$m_{esc} = mv \cdot r \cdot \sin(\theta_m)$$

pero también habrá cambiado BG que se habrá convertido, al moverse mv, en BG_m, tal que:

$$BG_m \cdot DESPLA = BG \cdot (DESPLA - mv) + r \cdot \sin(\theta_m) \cdot mv$$

$$GB = BG$$

con ello

$$mesc = mv. r. \sin(teta_m) = (BG. (DESPLA - mv) + r. \sin(teta_m). mv). \sin(teta)$$

que liga r.mv con teta_m y teta

$$\sin(teta) = 1 / (BG. (DESPLA - mv) / mv. r. \sin(teta_m) + 1)$$

El valor de teta que se puede alcanzar depende de r.mv y teta_m

Eso va a condicionar la masa móvil mv

Si analizamos la estabilidad del AUV con los criterios y técnicas indicadas en el citado reglamento ABS para sumergibles tripulados, para pasajeros, vemos que allí se establece un valor GB = 50 mm como referencia.

En aquel caso ese valor puede relacionarse con el efecto de que un pasajero se mueva.

En nuestro caso no tenemos referencias previs para establecer el valor GB, pero lo relacionaremos con el trimado o escora estática que pueda producirse por acción de los sistemas de gobierno.

Más en concreto, buscaremos que con la masa escorante del sistema de gobierno, moviéndose en los rangos que podamos alcanzar por geometría, se puedan alcanzar sin exceso, unos 45° tanto de escora como de trimado. No queremos superar esas inclinaciones.

6.4 Mecanismo de variación de trimado y escora.

6.4.1 Sobre el control de la trayectoria

En esencia, la trayectoria se modifica cambiando la **actitud**. (La actitud se define como la orientación espacial del eje longitudinal del AUV respecto al entorno. Se suele concretar con 3 ángulos:

- Trimado (ángulo formado por el plano horizontal y el eje longitudinal del AUV), angular respecto a la horizontal),
- escora (ángulo entre el plano de crujía del AUV y el plano vertical que pase por su eje longitudinal,
- azimut (ángulo entre un plano vertical que pase por el eje Norte-Sur de la tierra, y el eje longitudinal del AUV)

A su vez, la actitud se controla o modifica cambiando el estado de flotabilidad o moviendo pesos.

Además de lo anterior, si el vehículo está en movimiento, los planos alares generan fuerzas de sustentación y arrastre que influyen en la situación de equilibrio de la nave.

6.4.2 Propulsión

El sistema de propulsión de este submarino está pensado para funcionar en planeo, esto quiere decir que cuando está en superficie el cual se encuentra con flotabilidad positiva, al inundar su cámara de inmersión que se encuentra en proa para a estar en flotabilidad negativa por lo cual empezará a tender hundir la proa, esto genera una inclinación y al terminar de inundar esta cámara el submarino caerá por gravedad.

Las alas son su medio para conseguir un planeo y una inmersión controlada, con el cual produce una caída controlada, esto genera un avance en su inmersión, también interviene el módulo de escora el cual no solo se usa para hacer una virada, sino que también ese mismo peso móvil se desplaza adelante y tras para buscar una inclinación y velocidad correcta en la inmersión y emersión del submarino.

La emersión del submarino se consigue con la evacuación de la cámara de inundación la cual al desplazar esa agua consigue que el submarino vuelva a tener presión positiva, esto genera un cambio de estabilidad, con este cambio se consigue un cambio de posición lo cual genera que la proa se levante, con el cambio de trinado se consigue un mejor posicionamiento y mayor velocidad.

Este es el sistema de propulsión usado, esto genera un gran ahorro de energía en el submarino y poco consumo de los equipos consumidores más grandes, con ello el periodo de navegación para este sistema puede ser más largo.

6.4.3 Modelo de sustentación hidrodinámico

Los GLIDERson atractivos por la elegancia de su principio de funcionamiento, y su alto rendimiento energético. Esa economía energética de su propulsión los hace singulares y apreciados.

Vamos a analizar cómo se consigue la impulsión.

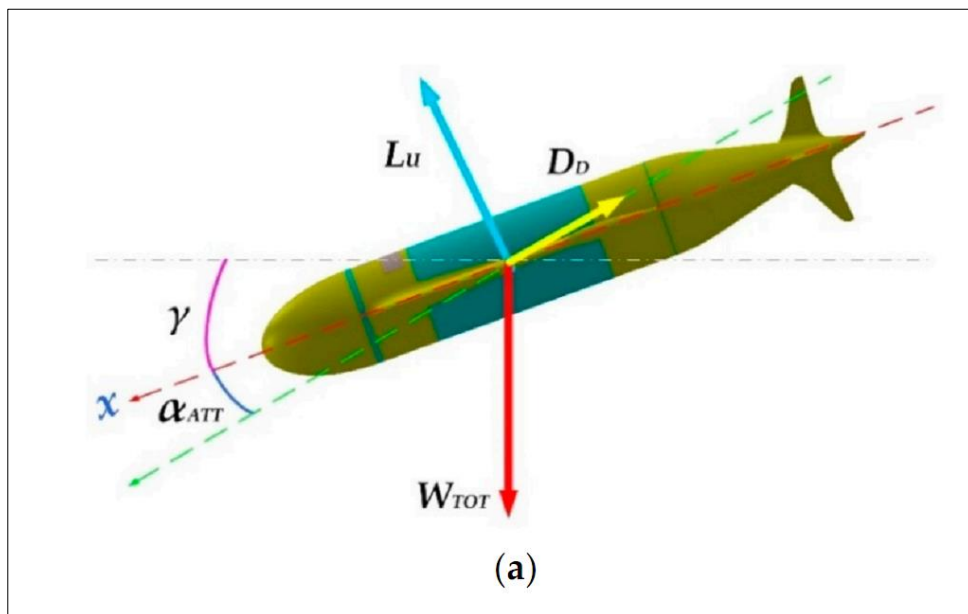


Ilustración 95 Plano de crujía del GLIDER. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

En la fig anterior, sacada de la ref (fig 7a de sensors-imprecisiones en flotabilidad), se muestra un GLIDER con su plano de crujía paralelo a esta hoja de papel. Las alas se ven como un segmento paralelo al eje longitudinal del cuerpo.

El GLIDER se mueve en una trayectoria de planeo a una velocidad V , y la trayectoria forma un ángulo $\gamma + \alpha_{att}$ con la horizontal. El trimado del GLIDER es el ángulo γ . El ángulo de ataque aparente del fluido sobre las alas de GLIDER es α_{att} .

En la figura se muestran los 3 vectores fuerza: sustentación (L), resistencia al

avance (D) y peso aparente o flotabilidad neta (W).

La fuerza de arrastre (D) es un vector que tiene la misma línea de acción que el vector velocidad (V), y la sustentación (L) es un vector perpendicular a la fuerza de arrastre. Ambas fuerzas, causadas por el movimiento, han de estar en equilibrio con la flotabilidad neta (W), que es la causa del movimiento.

$$\vec{W}_{TOT} + \vec{L} + \vec{D} = 0$$

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

Ilustración 97 Formula 1

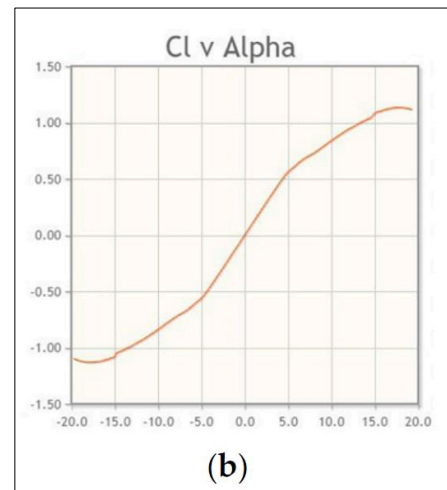


Ilustración 96 Curva Cl v Alpha

$$\begin{aligned} \text{Lift} = L &= q S C_L \\ \text{Drag} = D &= q S C_D \\ \text{Pitching moment} = m &= q S c C_m \end{aligned}$$

where:

$q = \frac{1}{2} \rho v^2$: is the dynamic pressure

S : is the characteristic area

c : is the mean aerodynamic chord

α_{att} : is the angle of attack

For the other coefficients, we have:

$$\begin{aligned} C_L(\alpha) &= C_L^\alpha \cdot \alpha_{att} \\ C_D(\alpha) &= C_D^0 + C_D^\alpha \cdot \alpha_{att}^2 \\ C_m(\alpha) &= C_m^\alpha \cdot \alpha_{att} \end{aligned}$$

Ilustración 98 Formula 2

The coefficient of drag C_D is composed of two members: the first C_D^0 is insensitive to the angle of attack and is constant; the second one ($C_D^a \cdot \alpha_{att}^2$) is instead a function of the square of the angle. Note that the zero lift coefficient $C_L^0 = 0$ because the wing profile that has been chosen for our project is symmetrical (type *Eppler 883*). Now is necessary to separate the contributions of the fuselage (body) and of the wings, for the three factors of lift, friction and pitching moment; so the expression is:

$$\begin{cases} \mathbb{L} = L^b + L^w \\ \mathbb{D} = D^b + D^w \\ \mathbb{M} = m^b + m^w \end{cases} \quad (9)$$

According to the Navier-Stokes (approximated) equations and the simplifications above cited, the previous system of equations becomes:

$$\begin{cases} \mathbb{L} = q \sqrt{V^3} \left\{ C_L^{b_a} \cdot \alpha_{att} + \frac{S_w}{\sqrt{V^3}} \cdot C_L^{w_a} \cdot \alpha_{att} \right\} \\ \mathbb{D} = q \sqrt{V^3} \left\{ \left[C_D^{b_0} + C_D^{b_a} \cdot \alpha_{att}^2 \right] + \frac{S_w}{\sqrt{V^3}} \left[C_D^{w_0} + C_D^{w_a} \cdot \alpha_{att}^2 \right] \right\} \\ \mathbb{M} = q \sqrt{V^3} \left\{ C_m^{b_a} \cdot \alpha_{att} - c_m \frac{l_{cb/ac_w} \cdot S_w}{c \cdot \sqrt{V^3}} \cdot C_L^{w_a} \cdot \alpha_{att} \right\} \end{cases} \quad (10)$$

where:

S_w is the wing area

l_{cb/ac_w} is the distance between the mean aerodynamic and the center of buoyancy.

c_m is a non-dimensional coefficient

This parameter is necessary to know the exact attitude and therefore the α_{att} to obtain a constant descent profile [66].

Ilustración 99 Formula 3

En resumen, tenemos fórmulas para estimar las fuerzas de sustentación y de resistencia y el momento de trimado, tanto para el cuerpo como para los planos de alas, en función de la geometría de cada uno de ellos, de la velocidad, y del ángulo de ataque. Y además la resultante de esas fuerzas se equilibra con la flotabilidad neta.

Los movimientos en el plano vertical se controlan por variación de la flotabilidad.

Variando la flotabilidad de la proa se modifica la actitud. Si el AUV tiene movimiento hacia delante, el equilibrio de fuerzas hidrodinámica e hidrostáticas dará lugar a una trayectoria condicionada por ese modo de

equilibrio. Alterando la flotabilidad tenemos un cierto control del movimiento dentro de un plano vertical. Sin embargo, corrientes, perturbaciones, etc harán que el GLIDER se desvíe de una trayectoria plana en ese plano vertical. De hecho, podría navegar en trayectorias impredecibles (espirales, etc), saliéndose del plano vertical correspondiente al rumbo inicial.

6.4.4 Configuración del plano vélico, planos sustentadores.

La forma, tamaño y situación de los planos sustentadores la vamos a terminar por similitud con otros modelos de GLIDER referenciados en la bibliografía.

Allí se indica que en los casos documentados se desprecia el efecto del fuselaje, y el cálculo se reduce a un ala fija, levemente retrasado respecto al centro de la longitud del cuerpo, y a un plano vertical en la cola.

El ratio básico es la relación entre la superficie en planta de las alas, y la fuerza de flotabilidad (o peso neto) del GLIDER, en unidades consecuentes. La siguiente figura es un resumen de algunos datos de referencia sacados de Ref. VACAS.

A. WOLEK, T. GODE, C. A. WOOLSEY, J. QUENZER AND K. A. MORGANSEN				
	Net Weight, \bar{W} (lbs)	Span, b (in)	Mean Geometric Chord, \bar{c} (in)	Wing Loading, W/S (psf)
Seaglider	0.33	29.4	6.68	0.24
Spray	0.49	38.7	4.13	0.44
Slocum	0.57	27.1	3.53	0.86
VTUG	5.51	40.0	4.00	4.96

Table 4.1: Comparison of wing geometry and wing loading

Ilustración 100 Comparison of wing geometry and wing loading

En nuestro caso, la flotabilidad máxima es $W = \pm 40 \text{ gr} = 0,040 \text{ kg}/0.450 \text{ Kg/lb} = 0,1 \text{ lbs}$

y la carga alar podemos admitir que sea $W/S = 0,4 \text{ psf}$ ((libras por pie²). Eso significa un área:

$$S = W/0,40 = 0,1 / 0,4 = 0,25 \text{ sf} = b.c / 12/12 = b.c / 144$$

$$b \cdot c = 144 \cdot 0,25 = 36$$

siendo $AR = b/c$, la relación de aspecto, b envergadura, y c cuerda del ala, podemos escribir:

$$AR \cdot c^2 = b \cdot c = 36$$

$$c^2 = 36 / AR,$$

Los valores de AR en la referencia oscilan entre 5 y 10,

Si tomamos $AR = 4$, resulta $c = 3$ in

es decir, $c = 7,5$ cm, $b = 30$ cm

Respecto a la configuración del plano de cola, hay que empezar por su misión. SE trata de un estabilizador que mantiene, como una veleta, la proa en la dirección de la marcha, es decir el eje popa-proa ha de ser aproximadamente colineal con el vector velocidad. Y eso debe ocurrir pese a que las alas puedan generar resistencias ocasionalmente asimétricas que tenderían a poner de través el GLIDER respecto a su trayectoria. El plano de cola actúa como una quilla que da estabilidad de rumbo.

En GLIDERsimilares, es usual que exista proporcionalidad entre el área del plano alar, y el del plano de cola. Mas concretamente se han establecido algunos coeficientes característicos de esa relación. Uno de ello es el coeficiente de volumen del plano de cola, definido como:

First, an empirical method (Raymer [21]) was used. This method uses the tail volume coefficient:

$$C_{vt} = \frac{L_{vt} S_{vt}}{b S}, \quad (4.1)$$

where L_{vt} is the distance between the aerodynamic center of the wing and the aerodynamic center of the vertical tail, S_{vt} is the vertical tail area, b is the wingspan, and S is the wing area.

Ilustración 101 Formula 4

Es un indicador entre el posible efecto perturbador ocasional inducido por las alas, a modo de roll, y la compensación causada por la cola, limitadora de una guiñada.

Es un valor adimensional, y en la referencia (5) de VaCAS se indica su valor en una tabla que reproducimos, para varios GLIDERcuyas disposiciones también se muestran aquí.

	C_{vt} (from Raymer [21]) (non-dim.)	$C_{n\beta}$ (from Roskam [22]) (1/rad)	$C_{n\beta}$ (from AVL [23]) (1/rad)
Seaglider	0.19	0.824	0.831
Spray	0.46	0.904	0.811
Slocum	0.34	2.317	1.829
VTUG	0.30	2.013	1.410

Table 4.2: Comparison of tail volume and $C_{n\beta}$ coefficients

Ilustración 102 Comparison of tail volumen and coefficients

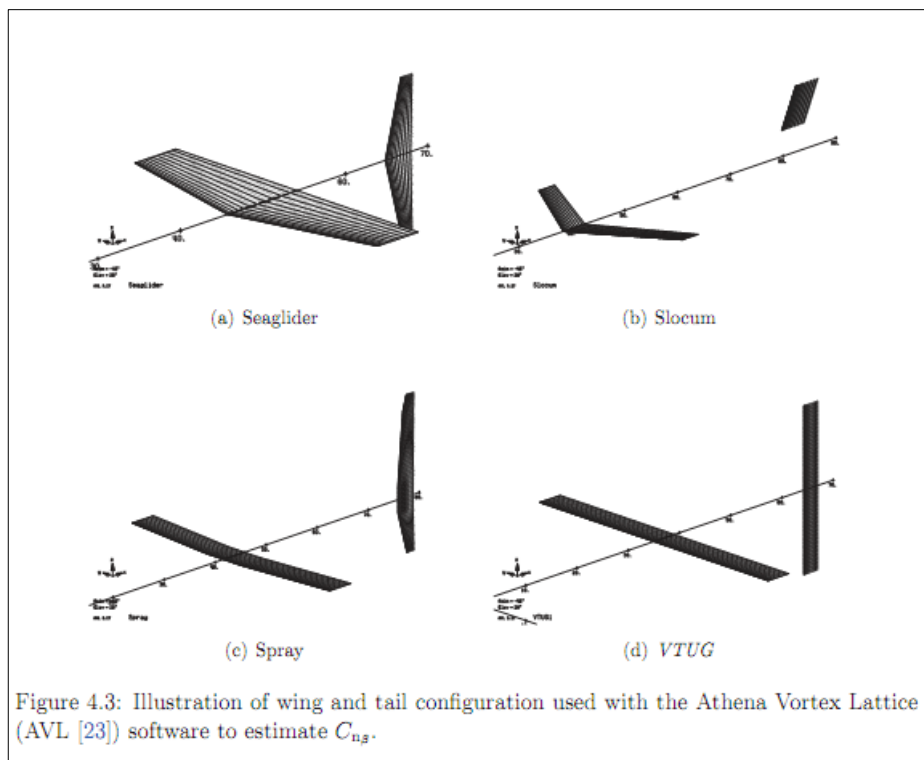


Ilustración 103 Illustration of wing

Además, pretendemos que nuestra configuración sea similar a la del VTUG, que es el modelo desarrollado en el proyecto Ref. VaCAS.

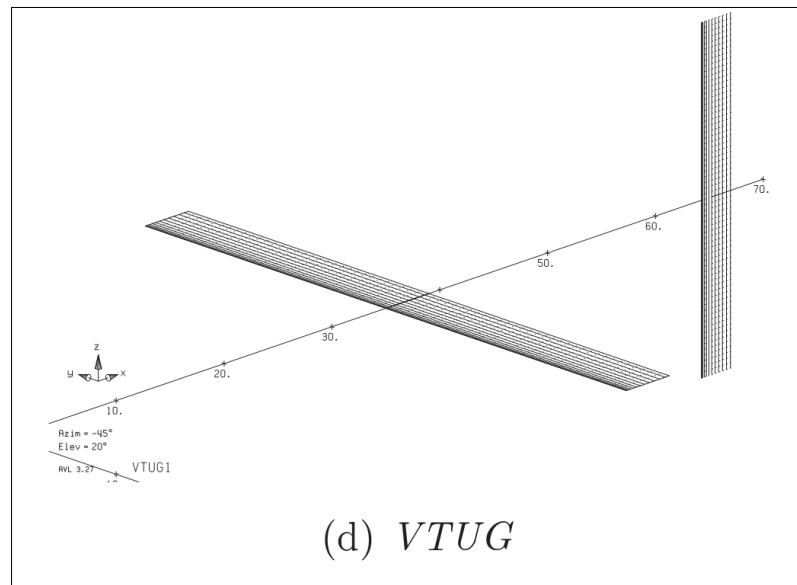


Ilustración 104 Plano velico

A la vista de los valores de los diversos GLIDER vistos en esa referencia, tomamos para el nuestro un valor intermedio,

$$C_{vt} = 0,30$$

Con ello todos los parámetros que intervienen en C_{vt} quedan definidos, salvo S_{vt} , el área de la cola vertical.

Solo quedaría por definir la relación de aspecto de esa cola vertical. Vamos a tomar un valor $AR = 6$ porque cumple con lo convencional en alas semi cortas.

Todo lo anterior nos ha permitido establecer la disposición de planos sustentadores que le 'corresponde' a nuestro GLIDER. Hemos partido de las dimensiones del GLIDER, y de su peso, y con la hipótesis de semejanza de carga alar con otros modelos de referencia obtenemos las dimensiones de alas, y plano de timón.

En resumen, hemos asumido que existe algún tipo de ley de semejanza con los otros GLIDER de referencia, y que esas leyes son la igualdad de coeficiente de carga alar, y de coeficiente de volumen del plano vertical de cola.

MODELO DE VUELO

Ahora vamos a avanzar más en el conocimiento del comportamiento de vuelo del GLIDER, y para ello vamos a asumir un modelo simple propuesto en el paper de Ref. **SLOCUM**. Allí se plantean las ecuaciones de fuerzas y momentos en equilibrio en un plano vertical, en régimen de planeo estabilizado, en 2 dimensiones: altitud o profundidad (en vertical) y avance de planeo (en horizontal).

Después de conformar una hoja de cálculo con todas las ecuaciones involucradas, podemos tener cifras concretas consistentes, que nos dan más información sobre las magnitudes de los parámetros de nuestro diseño.

Así se descubre que la senda de planeo típica, la más rápida en avance horizontal, se logra con los siguientes valores:

$$BG = 4 \text{ mm}$$

$$p \text{ max} = 40 \text{ gr}$$

$$V \text{ max} = 0,14 \text{ m/s}$$

$$\text{seta} = 30^\circ$$

$$\text{teta} = 28^\circ$$

$$\text{alfa} = 2^\circ$$

Unas explicaciones más detalladas y extensas se pueden ver en el ANEXO

del MODELO DE VUELO.

As shown in Figure 7, we denote the glide path angle by ξ where

$$\xi = \theta - \alpha.$$

At equilibrium, it may be shown that

$$\xi_{eq} = -\tan^{-1}\left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}}\right)$$

We also denote the glider speed by V where

$$V = \sqrt{(v_1^2 + v_3^2)}.$$

Using Equation (2) and our angle definition in Figure 7, we can write the glider depth rate as

$$\dot{z} = -V \sin(\xi) = -V \sin(\theta - \alpha) \quad (6)$$

The hydrodynamic forces and moment are modelled as

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D(\alpha) A V^2 \approx (K_{D_0} + K_D \alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (7)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L(\alpha) A V^2 \approx (K_{L_0} + K_L \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (8)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2} \rho C_M(\alpha) A V^2 \approx (K_{M_0} + K_M \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (9)$$

where C_D , C_L and C_M are the standard aerodynamic drag, lift and moment coefficients by cross sectional area, A is the maximum glider cross sectional area, and ρ is the fluid density. For the longitudinal quasi-steady fluid model, C_D , C_L and C_M are functions of α and the K 's are constant coefficients. This model is a standard one, derived using airfoil theory and potential flow calculations and then verified using experimental observations, see for example [2, 8]. A method for determination of the coefficients is described in Section 3.

This quasi-steady hydrodynamic model is expected to be accurate for equilibrium steady glides. It may

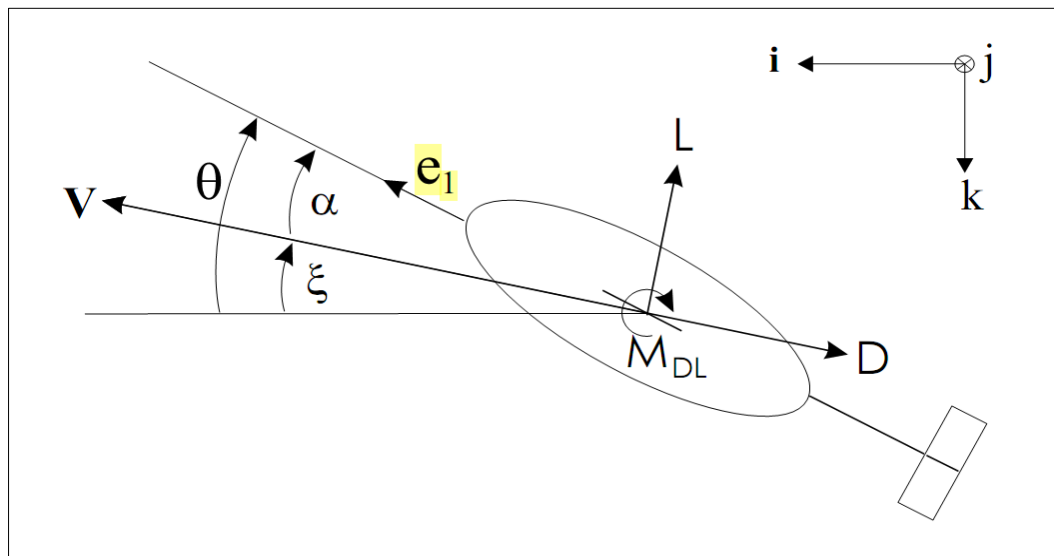


Ilustración 106 Geometría

En el capítulo 3 de la Ref. SLOCUM se trata sobre la identificación de parámetros en el modelo. Básicamente consiste en tomar mediciones de las diversas sendas de planeo que resultan en función de la flotabilidad de la vejiga natatoria de impulsión. Para cada vuelo se toman mediciones de velocidad, ángulo de planeo, ángulo de trimado, etc..

Finalmente se determina el mejor ajuste de los parámetros libres que hacen que el modelo pueda explicar en términos estadísticos (mínimos cuadrados...) el comportamiento observado.

En esta fase podríamos tomar como referencia el modelo matemático de cualquier GLIDER del que lo tuviéramos, pues es solo para poder seguir el razonamiento del proyectista. Siempre será necesario una realimentación de datos para corregir la desviación del diseño.

Claramente hace falta hacer mediciones reales. Como nosotros no tenemos aún el GLIDER, y mucho menos mediciones de su navegación, asumiremos directamente algunos parámetros del modelo del SLOCUM.

$$C_L(\alpha) = 11.76 \alpha + 4.6 \alpha |\alpha| \quad (13)$$

$$C_D(\alpha) = 0.214 \alpha + 32.3 \alpha^2. \quad (14)$$

$$C_M(\alpha) = 0.63 \alpha.$$

Ilustración 107 Formula 6

Estos coeficientes hidrodinámicos están referidos a un área A que es la máxima sección transversal del GLIDER, y el ángulo alfa es el ángulo de ataque medido en radianes. El rango de validez de esas fórmulas es $\alpha = \pm 9^\circ$. Para ángulos mayores se suele producir desprendimiento de flujo, pérdida súbita de sustentación, y entrada en pérdida.

Tenemos que aclarar aquí que al observar la ec (14) vemos que es errónea. No puede tener esa forma lineal en alfa. Ha de ser una errata del paper de referencia, y supondremos que es en realidad:

$$C_D(\alpha) = 0.214 + 32.3 \alpha^2$$

Lo cual tiene una forma más normal, consistente con la gráfica de la Ref SLOCUM.

No obstante, podremos en algún momento aplicar la teoría básica para deducir una formulación analítica para esos coeficientes hidrodinámicos C_i .

The hydrodynamic forces and moment are modelled as

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D(\alpha) A V^2 \approx (K_{D_0} + K_D \alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (7)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L(\alpha) A V^2 \approx (K_{L_0} + K_L \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (8)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2} \rho C_M(\alpha) A V^2 \approx (K_{M_0} + K_M \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (9)$$

where C_D , C_L and C_M are the standard aerodynamic drag, lift and moment coefficients by cross sectional area, A is the maximum glider cross sectional area, and ρ is the fluid density. For the longitudinal quasi-steady fluid model, C_D , C_L and C_M are functions of α and the K 's are constant coefficients. This model is a standard one, derived using airfoil theory and po-

Ilustración 108 Formula 7

En la ec (9) de la presente imagen se aprecia una errata, ya que en MDL, donde dice A hay que cambiarlo por c. A para mantener Cm adimensional, y c es la cuerda del perfil.

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 S}, \quad C_D = \frac{2D}{\rho V^2 S}, \quad C_M = \frac{2M}{\rho V^2 S c} \quad (1)$$

Ilustración 109 Formula 8

de von Mises, Chapter VII, Empirical airfoil data, pag 139

$$C_D = a + \frac{C_L^2}{b} = a + \frac{k^2}{b} \alpha'^2 \quad (5)$$

where a depends mainly on the shape of the profile and b mainly on the aspect ratio.

Ilustración 110 Formula 9

fórmula sacada de la VM ToF pag 142,

También se observa que C_m es lineal en α . Eso nos da una información importante. No está referido al centro de fuerzas aerodinámicas. En efecto, ese punto, que existe en todos los perfiles, es tal que la resultante de las fuerzas aerodinámicas pasa por él, sin que ese punto cambie, aunque se modifique α en un rango notable. Normalmente C_m es constante, con un valor mínimo, cuando está referido al centro de fuerzas aerodinámicas. Ese punto suele estar a $\frac{1}{4}$ de la cuerda, medido desde el borde de ataque del perfil. En cambio, si se refiere a otro punto, como el borde de ataque del perfil, ocurre que el momento creado es muy aproximadamente el momento de L respecto a ese punto. En la referencia Von Mises, teoría del vuelo, pag 146 se explica eso, y se da una fórmula

146	EMPIRICAL AIRFOIL DATA	[SEC. VII.1]
<p>The corresponding moment coefficient therefore equals</p> $C_{M_1} = C_{M_0} - \frac{1}{4}C_L \quad (10)$		

Ilustración 111 Formula 10

The outstanding fact concerning the variation of the moment coefficient with the angle of attack can be stated as follows: *For any given profile there exists a certain point F with respect to which the moment M and the moment coefficient have practically constant values as long as the angle of attack does not exceed the range of linearly varying C_L . The constant value of the moment coefficient depends on the shape of the profile but is practically independent of the aspect ratio.*

The point F is known as the aerodynamic center (a.c.) or the *focus* of the profile. For the usual profiles it lies near the chord line, about a quarter chord length aft the leading end, in accordance with the two-dimensional wing theory. The moment with respect to the aerodynamic center will be denoted by M_0 . The moment coefficient C_{M_0} has small negative values for simple (*i.e.*, unreflexed) profiles according to the terminology introduced in Sec. VI.2, the absolute value of C_M , decreasing with decreasing camber. (Note that the moment is counted positive

Ilustración 112 Referencia pagina 144 de VB ToF

if it tends to raise the leading end of the profile.) The coefficient C_{M_0} is zero for symmetrical and slightly reflexed profiles and positive for strongly reflexed profiles. For the modern slightly cambered simple profiles, C_{M_0} varies between 0 and -0.1 .

Experimental results concerning the pitching moments of airfoils can be represented in various ways. If C_{M_0} is plotted against α or α' or against C_L , the diagram will consist of a straight line parallel to the axis of abscissas. But if an airfoil is to be investigated experimentally, the position of the aerodynamic center is not known beforehand. The customary procedure is to measure the moment with respect to some well-defined point of reference and then to compute the moment coefficient with respect to the quarter chord point, i.e., the point on the chord

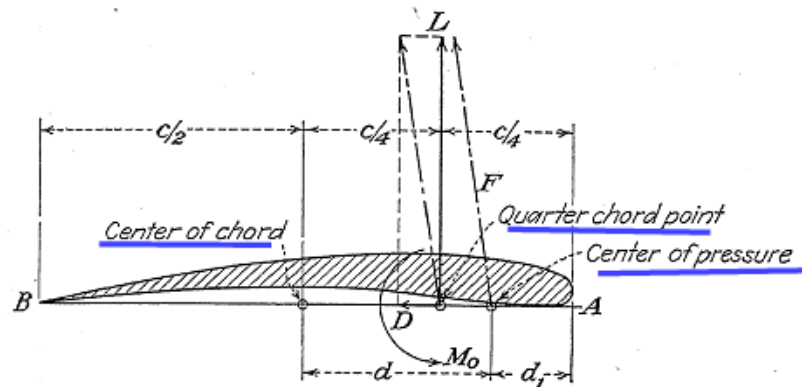


FIG. 101.—Center of pressure.

at one-quarter the chord length aft the leading end. In most cases, this moment coefficient will be fairly independent of the angle of attack, an indication that an aerodynamic center exists and that it lies near the quarter chord point.

In order to obtain an approximate relation between the moment coefficients with respect to various points of reference, we may assume that the aerodynamic center coincides with the quarter chord point and that, for the usual small angles of attack, the lift is practically perpendicular and the drag practically parallel to, and coinciding with, the chord AB (Fig. 101). The thrusts that the air exerts on the profile are statically equivalent to the forces L and D applied to the aerodynamic center and a couple of the moment M_0 . Under the assumptions here introduced the moment of this system with respect to the leading end A of the chord is

$$M_1 = M_0 - \frac{c}{4} L \quad (9)$$

The corresponding moment coefficient therefore equals

$$C_{M_1} = C_{M_0} - \frac{1}{4}C_L \quad (10)$$

The point where the line of action of the resultant force intersects the chord is sometimes called the center of pressure; if it has the distances d and d_1 from the center of the chord AB and from the leading end A , respectively (Fig. 101), the ratios d/c and d_1/c are given by

$$\frac{d}{c} = \frac{C_{M_0}}{C_L} + \frac{1}{4}, \quad \frac{d_1}{c} = -\frac{C_{M_0}}{C_L} + \frac{1}{4} \quad (11)$$

Ilustración 114 Formula 11. VB Tof

para perfiles simétricos C_{M_0} , referido al centro aerodinámico resulta cero. Y por ello, de la ec (1= de VM, deducimos que lo que nos están dando en SLOCUM es una forma parecida a (10), referido al borde frontal del perfil.

$$C_m = C_{m1}$$

pero en SloCUM

$$C_l = 11,76 \alpha \dots$$

$$C_{LD} = 0,63 \alpha$$

luego el punto al que están refiriendo C_{m1} será:

$$C_{m1} = C_{m0} + (x_0 - x_1)/c \cdot C_l$$

x medidos des el extremo de popa, borde de salida del perfil.

$$(x_0 - x_1)/c \cdot 11,76 = 0,63,$$

luego

$$(x_0 - x_1)/c = 0,63/11,76 = 0,65/12 = 1/20 = 0,05$$

luego X_1 está a un 30% del borde de ataque ($0,25 + 0,5$) = 0,3,

ese el punto al que están refiriendo C_m .

Nosotros lo estábamos asumiendo referido a 0,5 c, punto medio de la cuerda., es decir, aún más a popa.

Las masas si deben tomarse las de nuestro modelo, pues podemos medirlas.

The total stationary mass of the glider, m_s , (also referred to as body mass) is the sum of three terms: $m_s = m_h + m_w + m_b$. m_h is a fixed mass that is uniformly distributed throughout the body of the glider, m_w is a fixed point mass that may be offset from the CB, and m_b is the variable ballast point mass, also offset from the CB in the SLOCUM. $m_s = m_h + m_w + m_b$. The vector from the CB to the point mass m_w is \mathbf{r}_w . The vector from the CB to the variable ballast mass m_b is \mathbf{r}_b . The moving

4

Ilustración 115 Re Formula 12. VB Tof

internal point mass is \bar{m} . The vector $\mathbf{r}_p(t)$ describes the position of this mass with respect to the CB at time t . The total mass of the vehicle is then

$$m_v = m_h + m_w + m_b + \bar{m} = m_s + \bar{m}.$$

The mass of the displaced fluid is denoted m and we define the net buoyancy to be $m_0 = m_v - m$ so that the vehicle is negatively (positively) buoyant if m_0 is positive (negative). The different masses and position vectors are illustrated in Figure 6.

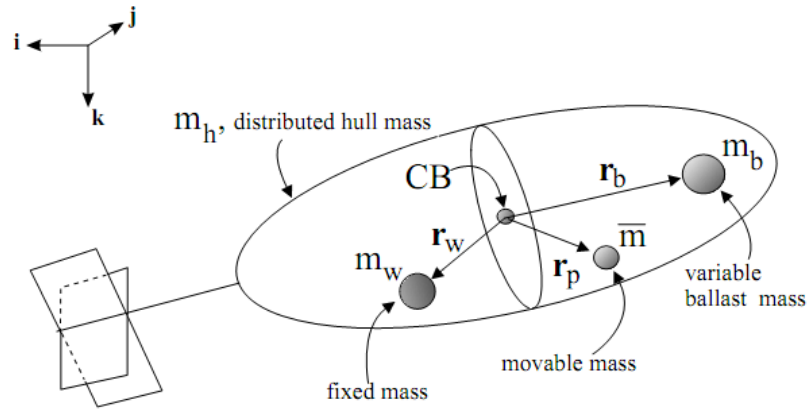


Figure 6: Glider mass definitions.

Ilustración 116 Glider mass definitions. VB ToF

Here we consider this model specialized to the longitudinal plane (assumed invariant), as in [7], and solve for the equilibrium steady glides in the equations of motion. The resulting SLOCUM vertical plane equilibrium equations are

$$\dot{x} = v_1 \cos \theta + v_3 \sin \theta \quad (1)$$

$$\dot{z} = -v_1 \sin \theta + v_3 \cos \theta \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 0 = & (m_{f3} - m_{f1})v_{1eq}v_{3eq} \\ & -\tilde{m}g(r_{P1eq} \cos \theta_{eq} + r_{P3eq} \sin \theta_{eq}) \\ & -m_{b_{eq}}g(r_{B1} \cos \theta_{eq} + r_{B3} \sin \theta_{eq}) \\ & -m_w g(r_{W1} \cos \theta_{eq} + r_{W3} \sin \theta_{eq}) \\ & +M_{DL_{eq}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = L_{eq} \sin \alpha_{eq} - D_{eq} \cos \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \sin \theta_{eq} \quad (4)$$

$$0 = L_{eq} \cos \alpha_{eq} + D_{eq} \sin \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \cos \theta_{eq} \quad (5)$$

where the subscript eq denotes the state at equilibrium steady glide. v_1 and v_3 are the components of the glider velocity in the \mathbf{e}_1 and \mathbf{e}_3 directions, respectively, as shown in Figure 5. Here, θ is pitch angle, α is the angle of attack, D is drag, L is lift and M_{DL} is the viscous moment as shown in Figure 7. m_{f3} and m_{f1} are the added mass terms corresponding to the \mathbf{e}_1 and \mathbf{e}_3 directions, as derived by Kirchhoff [6]. In these equations, as in [7], we take the added mass cross terms to be zero. We note that equilibrium terms corresponding to the offset mass m_w and the

As shown in Figure 7, we denote the glide path angle by ξ where

$$\xi = \theta - \alpha.$$

At equilibrium, it may be shown that

$$\xi_{eq} = -\tan^{-1} \left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}} \right)$$

We also denote the glider speed by V where

$$V = \sqrt{(v_1^2 + v_3^2)}.$$

Using Equation (2) and our angle definition in Figure 7, we can write the glider depth rate as

$$\dot{z} = -V \sin(\xi) = -V \sin(\theta - \alpha) \quad (6)$$

Ilustración 118 Formula 14

No obstante, para el modelo (masas incluidas) del SLOCUM, resultan las siguientes trayectorias

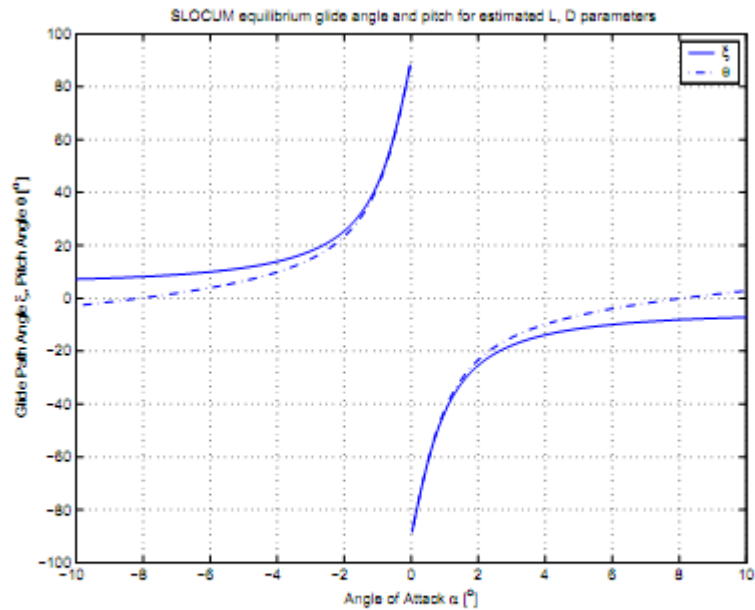


Figure 8: Equilibrium glides using lift, drag, esti-
Ilustración 119 Equilibrium flider using lift drag.

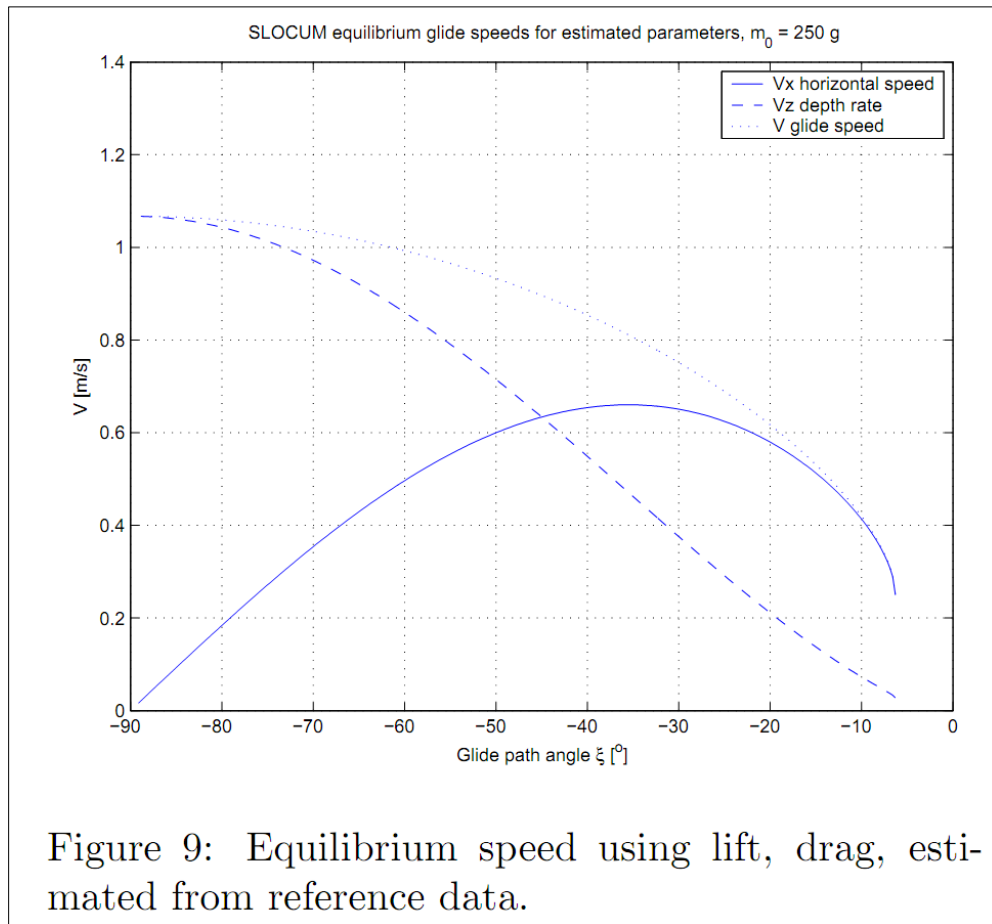


Ilustración 120 Equilibrium speed usin lift, drag, estimated from referenc data.

Las figuras equivalentes para nuestro modelo (que difieren en las masas), se puede construir.

An analysis of the equilibrium steady glide equations for a generic glider appears in [7]. One interesting property of the equilibrium steady glide equations is that the glide path angle is independent of the glide speed. Glide path angle depends only on the equilibrium angle of attack. When choosing an equilibrium glide, it is possible to specify the glide path angle, determine the required angle of attack, and then choose a glide speed V . The glide speed depends on the net buoyancy of the glider, set by the ballast control and the glide hydrodynamics.

Ilustración 121 Formula 15

Aparte de lo anterior hay que destacar unas ideas, extraídas del paper del SLOCUM:

1. el ángulo de planeo es independiente de la velocidad. Solo depende del ángulo de ataque de equilibrio.
2. Una vez establecido el ángulo de planeo, se puede deducir la velocidad, en función de otro parámetro como es la flotabilidad.
3. La velocidad depende muy directamente (aunque no solo, hidrodinámica, masas...) de la flotabilidad.

Otra forma elegante de poner los resultados es la que se muestra al final del Chapter4 en el paper de VaCAS, que incluimos a continuación., Y su explicación. B es la flotabilidad, en litros

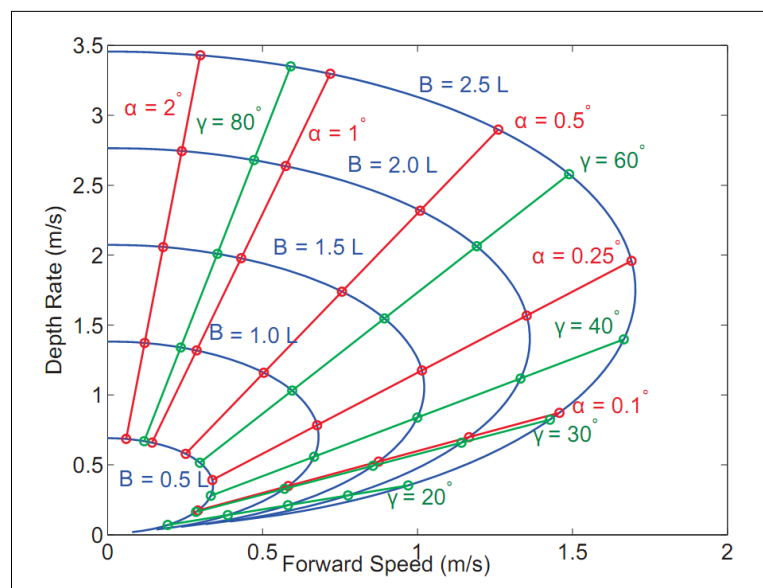


Ilustración 122 Grafica Depth rate and Forward speed

Figure 4.7: Spider plot: predicted performance of a hypothetical Seaglider equipped with a high displacement bladder. Lines of constant flight path angle (green) and angle of attack (red) are superimposed.

Ilustración 123 Spider plot

6.4.5 Gobierno

Respecto al movimiento en plano horizontal. Cambio de rumbo.

En algunos modelos de la bibliografía, se incluye una masa móvil posicionada con un motor, de modo que se controla el momento escorante en el AUV. Al modificar la escora, la trayectoria inicialmente en plano vertical se desvía girando en planta hacia la banda que queda descendida con la escora. Controlando la escora podemos hacer girar el AUV a una banda u otra, de modo similar a como lo hacemos al montar en moto o bicicleta.

6.4.5.1 Modelizado del control de estabilidad y cambio de rumbo

Hemos construido un modelo matemático sobre la estabilidad en este caso. Se ha confeccionado en GEOGEBRA. Este es un software OPEN source, muy didáctico, y con una comunidad grande y creciente. Lo hemos elegido para esta parte ya que es un entorno muy visual donde las relaciones geométricas son manejables de manera elegante.

Manipulando el modelo con los parámetros de pesos y dimensiones de nuestro AUV, podemos ver que el mecanismo de cambio de actitud-escora por el movimiento de la masa móvil es muy efectivo.

La siguiente es una copia de pantalla del modelo creado. Se aprecian las posiciones relativas del horizonte aparente, en azul, y el desplazamiento del peso móvil respecto a su posición inicial en crujía. Se ha supuesto un parámetro de estabilidad $BG = 10 \text{ mm}$, y una relación $mv/DESPLAZAMIENTO = 1/10$

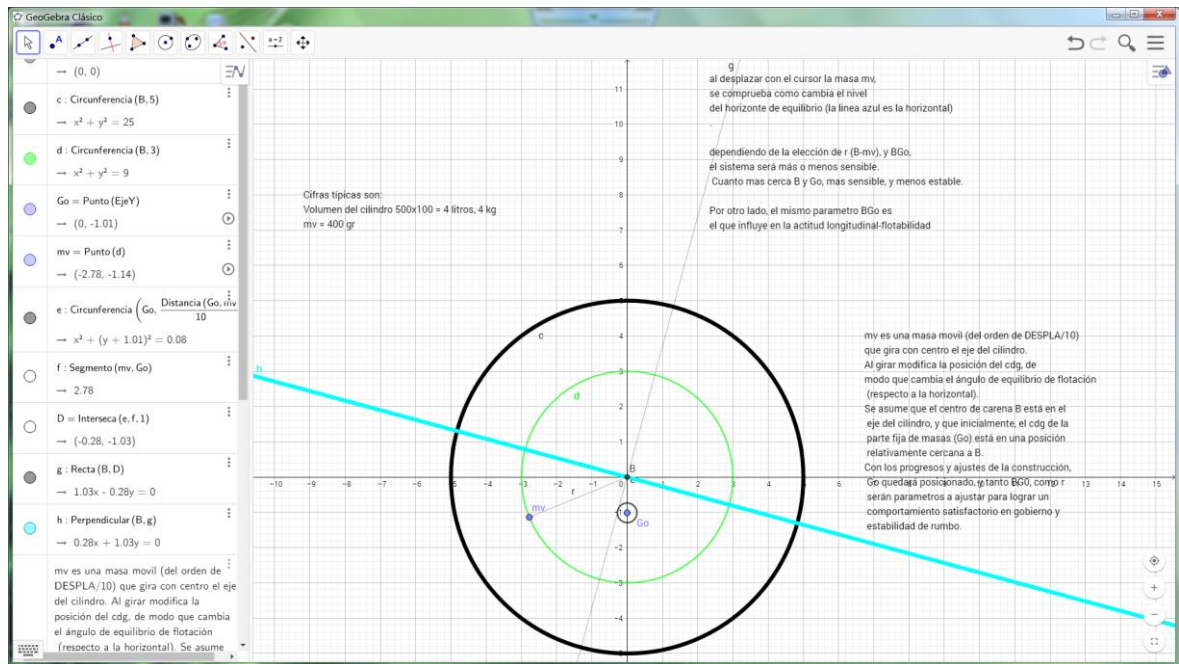


Ilustración 124 Estudio Glider. Geogebra clásico.

6.5 Control y electrónica

Este apartado es muy proclive a todo tipo de detalles y dispositivos complejos, para los que parece que no hay límites ni en imaginación ni en presupuesto. Hemos desgajado deliberadamente esta materia y hacemos una presentación general y de amplio espectro, donde caben desarrollos muy prometedores.

Bajo el agua la navegación queda condicionada por las ayudas disponibles. El magnetismo y la brújula pueden ser usados bajo el agua. No ocurre lo mismo con las comunicaciones de radiofrecuencia, (GPS, VHF, WIFI, BT, etc.). El rumbo si puede seguirse con controles tipo compás magnético, y la profundidad puede medirse con captadores de presión. Una combinación adecuada de captadores de presión, en forma de tubo de Pitot también puede dar información de velocidad. Controlando rumbo, velocidad, actitud, profundidad, etc. podemos conocer una estimación de la trayectoria.

Sin embargo, en el espíritu contextual de este TFG no pretendemos un desarrollo completo de la electrónica y el control, y por ello presentamos también una solución alternativa muy simple para esta parte:

Todos los detalles los hemos trasladado a otro estudio diferenciado, que constituye otro trabajo de fin de Ciclo académico (MASTER). Un Trabajo de Fin de Master (TFM).

6.5.1 Electrónica, electromecánica y control

En este apartado hay múltiples soluciones, y sus costes económicos son significativos para un TFG, ya que suponen decisiones con efectos difíciles de modificar. Mientras que, en proyecto, 'el papel lo soporta todo', en la fase de prototipo, los costes económicos y la puesta a punto requieren tiempo, trabajo de campo y circunstancias complejas que superan el alcance natural de un TFG como el nuestro.

Por ello, vamos a describir las funcionalidades que se desean o esperan en el AUV, dar alguna opción sobre alternativas de enfoque, subrayar las ventajas de soluciones ya desarrolladas tipo open software y open hardware, describir la existencia de open pilot y proyectos similares, que tienen todo muy desarrollado...

- también habíamos pensado en varios sensores de presión:
 - un diferencial, para construir un pitot, y medir la velocidad en el agua.
 - Uno Absoluto1, para medir la profundidad, por presión del agua exterior
 - uno absoluto2, para medir la presión en el interior del recipiente. Este no sirve de nada, ya que cuando pueda indicar una presión diferente de la atmosférica, significará que se ha producido una variación importante del volumen ocupado por el aire interior. Eso solo se producirá por entrada de una cantidad sustancial de agua, que alteraría su equilibrio de flotabilidad y por ello el AUV ya no podría emerger, y estaría perdido.
- un sensor magnético para evaluar el rumbo, bajo el agua,
- un sensor de inclinación longitudinal y otro transversal, para conocer el estado de actitud y escora.

pero finalmente concretaremos en una solución de coste mínimo en la que:

1. usaremos una arduino MEGA o UNO, que ya tenemos.
2. Usaremos stepers o servos que ya tenemos
3. requeriremos drivers simples que intentaremos usar directamente sobre la mega o uno,
4. no usaremos sensores, ni magnético, ni acelerómetros, ni presión...

En su lugar controlaremos las maniobras de inmersión, emersión por tiempo, tras un calibrado inicial, y posibilitando una secuencia de variación sistemática para ensayos controlados.

Como sustitución a los sensores estándar dedicados a la Arduino, podemos usar un smartphone en el payload que registre datos de modo continuo, con su propia APP. Esa app podría grabar datos de los sensores: inclinación o aceleraciones, etc, para después correlacionar eso con el tiempo y la profundidad, trayectoria, etc.

Como el ámbito de la electrónica, instrumentación, etc. puede ser muy extenso. Intentaremos modularizar tanto su descripción en el contenido del TFG, como su puesta en práctica, etc. de modo que podamos acotarlo en diversos estados de desarrollo, y que cualquiera de ello pudiera ser presentable como parte de este TFG en estado de entrega.

Después de algo de investigación, concluimos que para el accionamiento del émbolo de la cámara de flotabilidad usaremos un servo de tipo s3003, que es un estándar conocido, pero que habremos trucado para que actúe como motor de giro continuo, no limitado al sector de $\pm 60^\circ$. Hay varias formas de hacer ese trucaje, pero nosotros elegimos una modalidad en la que la placa electrónica interna de control del servo se mantiene, también adaptada, de modo que permite la regulación de la velocidad y el sentido de giro con las mismas señales de control PWM que las del servo original. De ese modo se produce un mapeo no lineal entre las posiciones 0-90-180 y las velocidades -Vmax – 0 - +Vmax. A efectos de programación, usaremos las librerías de los servos, y los mismos comandos que en control de servos.

Con ello podemos controlar ese servo directamente desde la placa Arduino. La Arduino va a suministrar la señal de control por un cable mono hilo, (usualmente el 9, en los ejemplos), pero también puede suministrar (a la vez) la alimentación 0-5V (grn – 5V) que requiere el servo. La intensidad demandada por el servo es pequeña, y es compatible con la salida de potencia del Arduino.

Para el control del peso móvil a efectos de estabilidad transversal usaremos un servo normal, que puede ser del tipo s3003, o de un tipo más pequeño. Ello es posible porque el par requerido en este caso es menor.

El montaje y la operación simultánea de ambos servos es posible.

Después de unas pruebas podremos calibrar el comportamiento del AUV, y relacionar tiempos con posiciones de émbolo, y también tiempo con actitud, y con distancia recorrida, tanto en horizontal como en profundidad.

Con ello la programación de trayectorias será simplemente establecer una secuencia de actuaciones bien definidas en el tiempo.

Es una forma simple a control (sin necesidad de sensores) que, pese a sus limitaciones, cumplirá nuestras necesidades inmediatas.

El fuerte de este TFG no es la electrónica, sino los aspectos relacionados más directamente con la Ingeniería Marítima: la estructura y la estanqueidad, y los mecanismos de maniobra. SOLO ESO, y es suficiente, por lo que en lo demás hay que evitar quedarse trabado. Ya se dijo que las posibilidades de equipamiento de sensores y controles relacionados abren un horizonte muy amplio para el diseño.

Hemos previsto que el control de la navegación pueda realizarse de modo autónomo. Para ello usaremos unos motores paso a paso, que aportan el elevado par y precisión que nos convenga. Usaremos un tipo NEMA17, ya que son muy comunes en el mundo de la impresión 3D DIY, y eso tiene un reflejo en las condiciones de precio.

Usaremos también elementos de electrónica de control drivers, adecuados a esos motores, y disponibles igualmente en el mundo 3DP.

También unas tarjetas de conexiones de los controladores, por ejemplo, la RAMPS 1.4, y una placa con un procesador principal, para controlarlo todo. El Arduino MEGA es una opción común y asequible.

Adicionalmente podríamos ampliar más la flexibilidad del sistema autónomo.

Para ello hemos previsto usar una Raspberry Pi, que admite ejecutar software de alto nivel en entornos Linux, y eso abre todo el abanico de comunicaciones en red, BlueTooth, USB, así como interactuar con otras plataforma informáticas comunes.

Arduino y Raspi pueden interactuar.

También se ha previsto que en el payload pueda ir un smartphone actuando como cámara de video registradora, etc.

6.6 Estimación económica

Finalmente hacemos una valoración de los componentes, del trabajo de montaje y otros trabajos de ingeniería y desarrollo, to ello queda de la siguiente forma en una tabla Excel donde se atiende los puntos a tener en cuenta.

Nombre y descripción	Nº Piezas	Coste
2 x NMEA17	2	14,00 €
Tubo metra quilato D 100 *3*2400	1	25,00 €
2 Plano chapa aluminio 2*30*0,15	2	20,00 €
Gramos impresos 1 kilos *,15 G	1000	150,00 €
Diseño CAD de las piezas y mejoras 50 €/h	40	2.000,00 €
Arduino Mega	1	20,00 €
Placa Ramps 1,4	1	12,00 €
Stepper drivers	2	8,00 €
Sensor de inclinación	1	15,00 €
Sensores magnéticos	1	20,00 €
Sensores de presión deferencia	1	20,00 €
Baterías 1,4 2700 Mah	50	60,00 €
Horas de proyecto técnico 60 €/h	60	3.600,00 €
Montaje del primer prototipo 15€ h	70	1050

Margen del erro 5%	0,05%	350,70 €
Beneficio industrial 12%	0,12%	841,68 €
Total Gastos		8.206,38 €

Después este cálculo de coste podemos ver el valor inicial que puede llegar a tener un proyecto básico y económico en la producción de un nuevo equipo, dando algo de valor a este trabajo ya que todas las horas dedicadas no se pueden calcular ni valorar en él.

6.6.1 Efecto de la escala en el coste

En nuestro caso, ejemplos de piezas cuyo coste fundamental es la cantidad de material son:

- Tubo del cilindro principal, de metacrilato (MC)
- tubo de la cámara de flotabilidad, de MC,
- tornillería y varillas de acero inoxidable:
- juntas de estanqueidad (de elastómero Cloruro de Butadieno, BUC)

Mientras que, por otro lado, ejemplos de piezas cuyo coste principal es el de conformado son todas las que hemos fabricado con la impresora 3D.

- Tapas estancas de los extremos del cilindro del cuerpo del GLIDER
- Ojivas hidrodinámicas de los extremos
- émbolo de la cámara de flotabilidad
- diafragmas y soportes del armazón estructural interior,
- Engranajes de la transmisión del mecanismo de cambio de flotabilidad

En estas piezas, ocurre también que una parte muy importante del coste de conformado es el propio diseño, ya que no son piezas estándar, sino que han tenido que diseñarse específicamente para este caso. Hay que destacar que el coste del diseño, sin embargo, no depende del tamaño de las piezas. El diseño es el único elemento de alto coste que no depende del tamaño de las piezas.

6.6.2 Tiempo de impresión en una impresora 3D según el tamaño de la boquilla del cabezal de impresión

Por ser este tema menos conocido vamos a explicarlo. El grado de detalle o finura de acabado que se puede conseguir con una impresora 3D de extrusión, como es la nuestra, depende por un lado de la velocidad, precisión y sAUVidad de los movimientos de su cabezal, respecto a la pieza, y por otro lado del tamaño de la boquilla de extrusión que condiciona el diámetro de filamento de plástico que se deposita sobre la pieza. El polímero, a una temperatura de unos 200 °C, está en estado plástico semi fluido. Su comportamiento se rige por las leyes de la viscosidad, muy dependiente de la temperatura y la presión. La potencia necesaria para hacer fluir el polímero por la boquilla se consume en 2 objetivos:

- calentamiento del polímero desde la temperatura ambiente a la de deposición (en nuestro caso 200-204 °C)
- impulsión a través de la boquilla de extrusión, al régimen (masa por unidad de tiempo, o volumen por unidad de tiempo) adecuado.

Sin entrar en la justificación podemos decir que, para una potencia determinada, hay un diámetro óptimo que hace máxima la velocidad de deposición (masa por unidad de tiempo).

- Si aumentamos el diámetro perderemos calidad en el acabado, y gastaremos menos tiempo y energía.
- Por el contrario, si reducimos el diámetro aumentaremos la calidad del acabado (la 'finura' de los detalles), pero gastaremos más tiempo y energía.

El efecto combinado hace que si necesitamos un grado de calidad superficial elevado, el diámetro debe ser pequeño, la velocidad de deposición también es pequeña, y los tiempos de impresión crecen mucho.

- Reducir la rugosidad superficial a la mitad supone reducir del mismo modo el diámetro del filamento depositado, y ello hace aumentar el tiempo de impresión más de 8 veces (el cubo de la escala de cambio de la rugosidad)
- aumentar el tamaño de la pieza en una escala dada supone multiplicar el tiempo de impresión por el cubo de esa escala.

Ambos efectos son independientes y acumulativos. La elección de una máquina de impresión 3D debe estar orientada a un tamaño y calidad de piezas determinado.

No todos los trabajos son abordables con una máquina determinada. Afortunadamente, podemos cambiar la boquilla de extrusión por otra de otro diámetro, y con ello aumentamos el rango de usabilidad de la máquina.

Respecto a un tiempo de impresión demasiado largo, hay que señalar que existe un riesgo no despreciable de que la impresión falle por alguna circunstancia. Cuanto más tiempo dure la impresión, más riesgo se acumula. Una simple ralentización por causa del software, o una corriente de aire sobre la zona de la boquilla puede hacer que la calidad de la fusión no sea la adecuada, y se produzca una irregularidad en la pieza, que se arrastre en las capas sucesivas y finalmente haga la pieza inservible.

6.6.3 Sobre el potencial de comercialización

Hemos visto que algunos productos similares se comercializan en Internet.

En nuestro caso se podría estudiar una posible comercialización a nuestra medida.

Podrían definirse varios tipos de lote o kit, según su completitud.

1. El producto- valor añadido - principal que podemos aportar es el suministro de las piezas de plástico ya impresas, cumpliendo las dimensiones y condiciones deseables. Como el trabajo de diseño e ingeniería ya está hecho, todo lo que se cargue sobre el precio de coste y envío va a ser beneficio directo. Eso permite mucha flexibilidad en asignar coste, y se puede jugar con ello como motor de comercializar otros productos, si fuera necesario.
2. El resto de componentes del kit pueden ser adquiridos por separado, ya que son disponibles de modo casi universal, y solo se requiere su identificación precisa y correcta. Esta parte del kit admite solo un margen muy pequeño de beneficio sobre costes e impuesto, que habría que aplicar para no perder dinero en el riesgo y trabajo de la intermediación correspondiente, incluidos transportes. Sin embargo, supone el grueso del coste del AUV terminado.
3. Existe un tercer nivel de comercialización. Si se comercializa ya montado existe otro valor añadido que puede suponer beneficio si se cuantifica correctamente, por encima del coste de las horas de comercializador.

Las ventajas del kit completo es que el potencial cliente ve reducido el riesgo de fracasar en la obtención del producto acabado.

Por contra, su inconveniente es que requiere mayor inversión y supone más riesgo para el comercializador.

Otro aspecto importante en la comercialización es disponer de una página web donde se le pueda dar la debida publicidad y sea el vehículo de la comercialización.

Si se incorpora este producto a una página ya existente (de terceros) de modelismo o de robótica o productos afines se puede mejorar la llamada a clientes.

Otro aspecto a considerar es el marco fiscal de estas transacciones. Hay que definir ese marco legal para evitar riesgos, responsabilidades por daños y fracaso.

Finalmente, cabe considerar protecciones anti-competencia. Se trataría de introducir algún elemento diferenciador que impidiera la copia fácil del producto, por otros posibles rivales comercializadores.

En nuestro producto podríamos incluir ese factor en la estanqueidad. Tenemos algunas hipotéticas vías:

1. Si diseñamos una junta suficientemente 'rara', aunque eficaz, eso podría despistar a los potenciales copiadore, e inducirlos al fracaso.
2. Si diseñamos una junta muy perfecta, pero no estándar, ganaremos competitividad por la calidad, aunque tendremos que estudiar y revisar nuestros costes por usar ese producto no estándar. Si este fuera el caso, el resto de elementos del diseño, afectados, deberían adaptarse a esa alternativa. Podemos trabajar en esta línea simplemente haciendo que el diámetro nominal de las juntas no sea un estándar frecuente, y hacer nosotros la juntas uniendo cordón toroidal. Sería preciso que las juntas de dimensiones estándar fueran ligeramente diferentes de las nuestras, y que ello hiciese que no consiguieran la calidad de sellado que se obtenga con nuestra dimensión. Parece difícil que nosotros mismos podamos acertar en el óptimo de una dimensión con tal efecto, pero podría ser un camino.

La historia de la patente de las juntas tóricas usuales es un ejemplo de la importancia de proteger un producto relativamente simple con un mecanismo anti-copia, en aquel caso la patente. Hubo de ocurrir un acontecimiento muy grave (la Segunda Guerra Mundial), para que el gobierno de los EEUU 'expropiara' la patente a sus propietarios legales del momento. Puede revisarse la anécdota en *Wikipedia*. Aquel paso pudo situar el producto en el dominio público, y desde entonces nos podemos beneficiar de ello.

Actualmente conocemos que las juntas tóricas son un elemento imprescindible y esencial de la maquinaria y la industria, como lo son también los tornillos.

Algunos fabricantes protegen sus productos contra la manipulación no autorizada por medio de tornillos especiales que sean difíciles de operar. Puede ser un sistema bastante disuasorio.

Conclusión.

Se puede decir que hemos alcanzado los conocimientos necesarios para realizarlo y poder decir que no solo fue teórico, que lo hemos podido probar y ver su evolución no solo conceptual sino una evolución física y práctica.

Nos hemos comprometido en un trabajo muy ambicioso que nos ha llevado bastante tiempo y esfuerzo.

Por razones prácticas hemos considerado adecuado y necesario dividirlo en 2 partes.

Este TFG se identifica con la primera parte. En él hemos conseguido dar solución a los asuntos técnicos y prácticos relacionados con el estudio, el diseño, y la construcción (efectiva) de un vehículo autónomo submarino de tipo planeador (AUV GLIDER). Y lo hemos logrado. Tenemos un producto real con los elementos básicos necesarios para navegar bajo el agua. Cumple todos los requisitos que hemos previsto para ello, y responde a los mismos principios básicos de otros similares que ya existen.

Soportando este TFG hay muchas horas de estudio de la información publicada en la web sobre otros productos semejantes. Muchas horas de dudas y reflexiones. Finalmente, lo que se muestra en este TFG es solo un resumen de esa trayectoria que nos ha llevado a un producto real: Un planeador submarino, un GLIDER.

La próxima etapa ya está planificada. Su plan se estaba fraguando en paralelo, desde hace tiempo, mientras trabajábamos en la primera parte. Esa segunda y última parte (el final de esta aventura) será objeto de un TFM, con el mismo alumno y mismo director de trabajo.

En ese TFM se mostrará como el GLIDER es capaz de navegar de manera adecuada, autónoma, y cumpliendo un 'plan de viaje' previamente diseñado.

En términos de construcción naval podemos decir:

Ya hemos realizado la botadura y el armamento del buque que habíamos diseñado. “parece terminado”. Es este TFG.

Nos falta arrancar todos los sistemas y dotar una tripulación ‘virtual’ que haga navegar al buque. Y eso será el siguiente trabajo.